Aus der Abteilung für Phoniatrie und Audiologie
der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. D. Plester

KRITISCHE UNTERSUCHUNGEN ZU EINEM FUNKTIONSMODELL DES GESTÖRTEN INNENOHRS

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades der
Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

BERTHOLD KRATZENSTEIN
aus Goslar/Harz

1984

LEUVEN

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546526_0035

Aus der Abteilung für Phoniatrie und Audiologie
der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. D. Plester

KRITISCHE UNTERSUCHUNGEN ZU EINEM FUNKTIONSMODELL DES GESTÖRTEN INNENOHRS

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades der
Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

BERTHOLD KRATZENSTEIN
aus Goslar/Harz

1984

Dekan: Prof. Dr. D. Plester
1. Berichterstatter: Prof. Dr. H. Breuninger
2. Berichterstatter: Priv. Doz. Dr. M. Strohm

Meinen Eltern und
meiner Frau Ingrid

An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr. Breuninger für die Bereitstellung des Themas und für sein Referat;

Herrn Ing. G. Sesterhenn für die stets freundliche und hilfsbereite Beratung bei der Durchführung der Versuche und Durchsicht des Manuskripts;

sowie dem Personal der audiologischen Abteilung und dem übrigen Personal der Klinik.

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
I.	PHYSIOLOGIE UND PATHOPHYSIOLOGIE DES INNENOHRS	1
	A) Physiologie des normalen Gehörs	2
	B) Pathophysiologie der Innenohrschwerhörigkeit	3
	1. Morbus Menière	3
	2. Hörsturz	4
	3. Akustisches Trauma	5
II.	TONNDORF'S THEORIE ZUR GEMEINSAMEN GENESE VON AKUTEN INNENOHRVERÄNDERUNGEN 1980	6
	1. Tinnitus	6
	2. Rekruitment	7
	3. Geringe Sprachverständlichkeit	9
	4. Nulldurchgangsverzerrung (center-clipping)	10
III.	EXPERIMENTELLER TEIL	13
	A) Versuchsteil	13
	1. Patientenauswahl	13
	a) Allgemeine Kriterien	13
	b) Auswahl der audiometrischen Daten	13
	2. Versuchsdurchführung	13
	3. Versuchsaufbau und Auswertungsmodus	18
	B) Ergebnisse	22
	1. Verständlichkeit der Wörter	22
	2. Verständlichkeit der Laute	22
	3. Erstellung einer eigenen Normkurve	33
	4. Vergleich der Prüfpegel zwischen Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit und Normalhörenden	35
	5. Einzelbetrachtung der Laute	40
	6. Vergleich zwischen Normalhörenden und Innenohrschwerhörigkeit-Patienten der verstandenen und nicht verstandenen Laute	42
	a) Bei mittlerem Verzerrungsgrad	42
	b) Bei starker Verzerrung	42

Seite

7. 3-dimensionale Analyse des Wortes Frist 46
8. 2-dimensionale Analyse des Wortes Frist 46

IV. DISKUSSION 49
1. Auswirkungen des center-clipping auf die Lautverständlichkeit 49
2. Psychoakustik der Sprachverständlichkeit 50
3. Zentrale Verarbeitung des Schallreizes und Innenohrpotentials 51
4. Einfluß von Nulldurchgangsverzerrungen auf die Innenohrschwerhörigkeit und Tonndorfs Theorie 53

V. ZUSAMMENFASSUNG 57

VI. LITERATURVERZEICHNIS I-IV

I. PHYSIOLOGIE UND PATHOPHYSIOLOGIE DES INNENOHRS

Einleitung und Fragestellung

Unter den Forschern, die sich mit der Physiologie des Gehörs befassen, gehen in letzter Zeit die Tendenzen dahin, die außerordentliche Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs einer komplizierten Mechanik des Innenohrs zuzuschreiben. Konsequenterweise suchen daher einige Autoren die Pathophysiologie der Innenohrschwerhörigkeit auf Defekte der Innenohrmechanik zurückzuführen (Tonndorf ....).
Ein für die Otologen bekanntes Phänomen der Innenohrschwerhörigkeit besteht darin, daß es nicht nur zu einer Abnahme der Empfindlichkeit, d.h. zu einem Absinken der Hörschwelle kommt. Dieses ist auch bei der Mittelohrschwerhörigkeit der Fall, wobei hier der Hörverlust durch Verstärkung fast vollständig ausgeglichen werden kann (eine Ausnahme bildet oft die Otosklerose). Solche Patienten erreichen mit dem Hörgerät meistens wieder ein 100%iges Sprachverständnis. Bei der Innenohrschwerhörigkeit liegen die Verhältnisse wesentlich komplizierter.
Es muß ein erhöhter Schalldruck aufgewandt werden, damit es überhaupt zu einer Hörwahrnehmung kommt. Oberhalb der Schwelle der Wahrnehmung ist die verbliebene Restdynamik des Gehörs stark eingeschränkt. Schallpegel von 100 - 110 dB, welche für den Normalhörenden noch erträglich sind, werden vom Schwerhörigen bereits nicht mehr toleriert. Selbst wenn die Schwelle der Unbehaglichkeit subjektiv nicht herabgesetzt ist, kann bei höheren Pegeln das Sprachverständnis wieder abnehmen. Der Patient "hört", versteht aber nicht. Die Sprache klingt undeutlich, verzerrt. Es besteht daher nicht nur ein quantitativer, sondern auch ein qualitativer Hörverlust.

Es gibt verschiedene Formen der Innenohrstörungen:
Entzündliche Erkrankungen (Labyrinthitis), Menière-Krankheit, Acusticusneurinom, Caisson-Krankheit, Akustisches Trauma, Toxische Schäden des Innenohrs, Herpes zoster oticus, angeborene Schallempfindungsschwerhörigkeit oder Taubheit. Die

verschiedenen Störungen haben u.a. ein gemeinsames Hauptsymptom: die Innenohrschwerhörigkeit.

Zur Pathophysiologie der Innenohrstörungen gibt es verschiedene Erklärungen, die nachfolgend aufgezählt werden. Zum besseren Verständnis sei jedoch zuerst die Physiologie des normalen Gehörs kurz umrissen.

A) Physiologie des normalen Gehörs

Hohe Frequenzen werden bei der Cochlea zum ovalen Fenster hin abgebildet, tiefe Frequenzen in Richtung zum Helikotrema. Die Hydrodynamik der Cochlea stellt man sich heute nach der Wanderwellenhypothese von Bèkesy und Ranke[27] vor. Die Mechanik der Basilarmembranbewegung ist noch nicht endgültig geklärt[17]. Die Bewegungen, die die Basilarmembran ausführt, wenn Wanderwellen den Endolymphschlauch entlang - laufen, führen zu einer Verschiebung der Membrana tectoria gegenüber der Basilarmembran und den darauf befindlichen Cortischen Organ. Die Zilien der Haarzellen sind mit der Tektorialmembran fest verhaftet[32]. Wenn sich die Tektorialmembran gegenüber der Basilarmembran verschiebt, werden die Zilien abgeschert, was für die Rezeptorzellen den adäquaten Reiz darstellt. Der relativ feste Kontakt zwischen den Stereozilien und der Tektorialmembran scheint dabei von großer Bedeutung zu sein: Bei der hohen Sensitivität der Rezeptoren müßte die Brownsche Molekularbewegung einen ständigen Reiz für das Ohr darstellen, da die dünnen Zilien ohne weiteres durch die Molekularbewegung ausgelenkt werden könnten. Bei der vorhandenen Empfindlichkeit der Rezeptoren müßte ein ständiges Rauschen hörbar sein. Der Kontakt zwischen Zilien und Tektorialmembran schränkt jedoch die Beweglichkeit der Zilien ein, so daß bei voll erhaltener Sensitivität gegenüber Scherbewegungen die Brownsche Molekularbewegung keine Rolle mehr spielt. Dadurch ist die niedrige Hörschwelle erklärbar[14].

B) Pathophysiologie der Innenohrschwerhörigkeit

1. Morbus Menière

Im Anfall besteht eine Schallempfindungsschwerhörigkeit mit typischer wannenförmiger Hörschwellenkurve im Tonaudiogramm, also ein Haupthörverlust im tiefen und mittleren Frequenzbereich (mediocochleärer oder apikocochleärer Typ). Außerdem besteht ein positives Rekruitment, das angeblich auf einen Ausfall der äußeren und erhaltener Funktion der inneren Haarzellen zurückzuführen ist[5]. Bei Schallempfindungsschwerhörigen wird oft, trotz maximaler Verstärkung, keine 100 % Wortverständlichkeit erreicht, es besteht ein Diskriminationsverlust (Helm-Kurve im Sprachaudiogramm[6]). Bei den aufgeführten Funktionsstörungen wird entweder eine mechanische oder eine sesorisch-neurale Ursache diskutiert.

a) Für die Hörstörung bei M. Menière hat vor allem Tonndorf[39-41] mechanische Ursachen erwogen. An mechanischen Schneckenmodellen[40,41] konnte Tonndorf zeigen, daß sich mehrere für die Menièrsche Krankheit charakteristische Hörstörungen durch den endolymphatischen Hydrops erklären lassen. Während einer akuten Hydropsperiode ist die endo-, perilymphatische Druckdifferenz ausschlaggebend, unter chronischen Bedingungen jedoch die Massenbelastung durch Volumenzunahme des Ductus cochlearis, da die Reissnersche Membran ihre Elastizität verliert. Bei Druckdifferenz entsteht ein Hörverlust im Tieftonbereich, da der Steifheitsgradient als grundlegende Struktureigenschaft der Basilarmembran (Wanderwellen!) zur Spitze hin abnimmt. Massenbelastung hingegen bewirkt gleichmäßigen Hörverlust.
Die ebenfalls zu beobachtende Diplakusis läßt sich auf die gleiche Weise erklären. Massenbelastung verschiebt das Wanderwellenmaximum basalwärts (Tonhöhe erscheint höher), Druckdifferenz apikalwärts (Tonhöhe erscheint tiefer). Beide Formen der Diplakusis werden beobachtet[39].
Schuknecht[36] erwägt eine Kaliumintoxikation des Cortischen Organs, Stoffwechsel - oder Blutversorgungsstörungen

in der Apikalregion.

b) Die Pathophysiologie bei M. Menière ist äußerst strittig bei der Erklärung des Rekruitment. Die elektronenoptischen Befunde der Haarzellen stehen nach Kimura[16] in keinem Verhältnis zum Ausmaß des Hörverlustes. Die morphologischen Veränderungen der Haarzellen sind geringfügig, an den äußeren jedoch etwas stärker ausgeprägt.

Tumarkin meint, daß die Deckmembran durch Quellung von den äußeren Haarzellen abgehoben wird, während Boenninghaus die Ausbauchung der Basilarmembran, der die Membrana tectoria schlecht folgen kann, für eine stärkere Zerrung der äußeren Haarzellen verantwortlich macht[11].
Nach Tonndorf[39] ist das Rekruitment auf eine Entkupplung der Verbindung zwischen Stereozilien und Deckmembran zurückzuführen. Die Entkupplung bewirkt einen Spielraum, der bei zunehmender Amplitude kleiner wird und schließlich verschindet ('center-clipping'). Die Entkupplung ist nach Tonndorf ebenfalls für das Ohrensausen verantwortlich.

Schmidt[34] fand jedoch ein erhöhtes Summationspotential in den äußeren Haarzellen bei M. Menière. Dieser Befund ist schwer zu vereinbaren mit der Hypothese des Recruitment als einer Haarzellfunktionsstörung.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Diskussion über die pathophysiologischen Grundlagen der Funktionsstörung bei M. Menière über Hörverlust, Recruitment und Ohrensausen noch nicht abgeschlossen ist.

2. Hörsturz

Beim Hörsturz besteht ebenfalls eine Innenohrschwerhörigkeit mit positivem Rekruitment. Im Tonaudiogramm sieht man z.B. eine Hydropskurve wie bei M. Menière, einen Abfall der hohen Frequenzen, gleichmäßigen Hörverlust in allen Frequenzen, oder es ist eine völlige Ertaubung vorhanden.

3. Akustisches Trauma

Durch Knall, Explosion, Lärm oder stumpfes Schädeltrauma kommt es zur Degeneration der Haarzellen im Corti-Organ. Die äußeren Haarzellen werden zuerst geschädigt. Sie werden verformt, schwellen an, und werden schließlich aufgelöst. Schon bei Belastungen mittleren Grades kommt es zu Veränderungen der Sinneshaare in Form unregelmäßiger Verbiegungen, Fusionen und Ausbildung von Riesenhaaren, oder der Bildung von Blasen an der Haaroberfläche. Die inneren Haarzellen werden nach außen abgeknickt, viel frühzeitiger als bei entsprechenden Veränderungen der äußeren Haarzellen, die wegen ihrer geringen Länge und Anordnung offensichtlich resistenter sind[31]. Zurückbildungsfähig sind die Schwellungen, die nicht zu stark ausgeprägten Dendritenschwellungen der inneren Haarzellen, sowie die Bläschenverdichtungen an den äußeren Haarzellen.

II. TONNDORF'S THEORIE ZUR GEMEINSAMEN GENESE VON AKUTEN INNENOHRVERÄNDERUNGEN[37] 1980

Nach Tonndorf kann der Hörverlust, das Rekruitment, die geringe Sprachverständlichkeit und Ohrengeräusche, die kennzeichnend sind für akute Innenohrveränderungen, durch eine Entkopplung der Haarzellen von ihrem Auslenkungssystem, der Deckmembran, erklärt werden. Die Entkopplung kann entweder durch einen vorübergehenden Steifheitsverlust der Stereozilien (bei TTS) bedingt sein, oder durch vorübergehende und/oder chronisch pathologische Veränderungen der Sterozilien (bei Antibiotika-Intoxikationen und endolymphatischen Hydrops). Solange die Stereozilien-Kopplung elastisch ist, ist die Entkopplung nur partiell. Hörverlust und Ohrensausen sind gekennzeichnet durch eine verringerte Kopplung, der Umfang des Verlustes ist abhängig vom Grad der Entkopplung und der Anzahl der betroffenen Haarzellen. Rekruitment und geringe Sprachverständlichkeit ergeben sich aus center-clipping, welches das direkte Ergebnis einer partiellen Entkopplung der Stereozilien ist.

1. Tinnitus

Tinnitus ist eine der Hauptklagen der Patienten mit cochleären Störungen. Tonndorf ist der Ansicht, daß diese Geräusche durch eine Entkopplung der Haarzellen von der Deckmembran zustandekommen. Harris[14] berechnete den Geräuschpegel bei enger Kopplung der Haarzellen mit der Deckmembran und bei lockerer Kopplung. Bei enger Kopplung bekam er einen Geräuschpegel von ca. 20 dB unter der Hörschwelle in der frequenzempfindlichsten Region. Bei lockerer Kopplung fand Harris einen Anstieg des Geräuschpegels um 55 dB. Tonndorf führt den Ursprung der Ohrengeräusche cochlearen Ursprungs auf eine teilweise Entkopplung der Haarzellen von der membrana-tectoria zurück, wobei der Pegel der Ohrgeräusche bei den meisten Patienten kaum höher als 20 dB über der Hörschwelle liegt.

Die Art der Geräusche, die in der Cochlea erzeugt werden, hängen vom Ort und der Ausdehnung der verursachenden Schädigung, der Cilienentkopplung ab. 'Donnernde' Ohrgeräusche, niederfrequent, bei fluktuierendem Hörverlust, deutet auf eine apikale Region; bezeichnenderweise ist der Hörverlust niederfrequent.
Ein hohes, ton-ähnliches Ohrgeräusch, sehr schmal und hochfrequent, ist typisch für TTS. Betroffen ist nach Tonndorf[37] ein beschränktes Gebiet der Basalwindung. Daher gibt es eine enge Beziehung zwischen der Stelle der Schädigung und dem Typ des vorkommenden Gehörverlust und die Art der Geräusche.

2. Rekruitment

Durch die Entkopplung der Haarzelle entsteht Leerlauf (deadplay). Wenn ein Signal eine Haarzelle mit Leerlauf erreicht, führt dies zu einem Amplitudenverlust und zu einem centerclipping wie Fig. 1 A. Der Übertragungsverlust der Amplitude ist konstant. Mit einem Ansteigen der Lautstärke des Signals muß die Amplitudenabschwächung allmählich kleiner werden, eventuell sogar verschwinden (Fig. 1 B).
Fig. 3 C zeigt solche wechselnden Amplitudenbeziehungen in einer Input/Output-Funktion. Kurve 1 Fig. 1 C zeigt eine Funktion ohne zentrale Beschneidung. Kurve 2 zeigt eine Funktion mit zentraler Beschneidung. Bei Innenohrschwerhörigkeit gibt es einen steileren Anstieg als gewöhnlich bei der Output-Amplitude. Kurve 2 vereinigt sich allmählich mit Kurve 1 (ohne zentrale Beschneidung). Wenn die zentrale Beschneidung ausgedehnter ist, ist der Innenohrschaden größer, und die gesamte Kurve 2 verschiebt sich weiter nach rechts und vereinigt sich mit Kurve 1 auf einem entsprechend höheren Pegel. Kurve 2 stellt eine typische Rekruitmentkurve dar, wobei das Rekruitment ein Leerlauf der ciliaren Funktion ist, eine Haarzellen-Fehlfunktion. Bei retrocochleären Störungen wurde kein Rekruitment gefunden.
Vollkommenes Rekruitment wird nach Tonndorf durch teilweise Entkopplung der Haarzellen verursacht; over-recruitment bei

voller Funktion und/oder strukturellen Verlust der Haarzellen; under-recruitment bei abgeschwächter Haarzellenfunktion durch eine metabolische Insuffizienz.

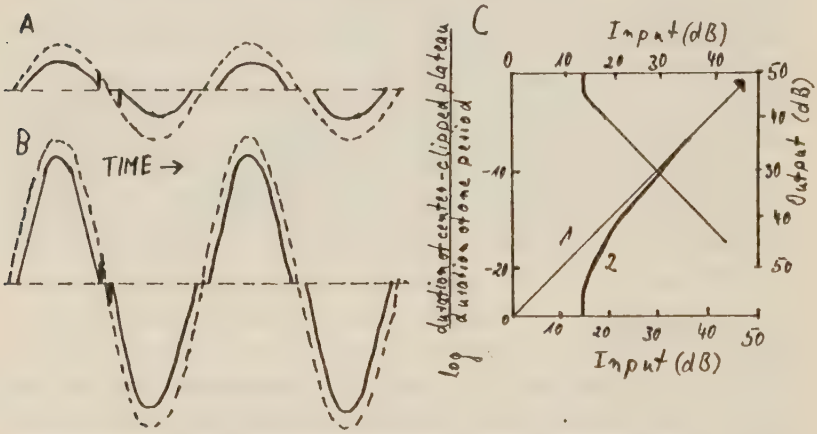


Abbildung 1

Text nach Tonndorf[37]:

A) Center-clipped waveform (solid-line) together with the original, unclipped waveform (dashed-line).

B) Same two waveforms after a three-fold increase in amplitude. Note that the reduction in amplitude is fixed (short vertical lines at the first zero-line crossing). Thus, in the 'amplitude-domain', the reduction becomes relatively less with increasing signal amplitudes. In the 'time' domain, the duration of the zero-level plateaus decreases with the signal amplitude rather sharply, since it is related to the slope of the original waveform at the zero crossings as schematically shown in Figures A und B. This slope increases steeply with signal amplitude.

C) Curves 1 and 2: Input/output functions for a linear relation without center-clipping (curve 1) and with center-clipping (curve 2).
Curve 3: the fractional duration, in logarithmic values, of the zero-level plateau as function of signal level.

3. Geringe Sprachverständlichkeit

Beim Rekruitment und bei geringer Sprachverständlichkeit wird eine ursächliche Beziehung zum center-clipping diskutiert. Beim Rekruitment wurde gezeigt, daß es nur eine Erscheinung eines bestimmten Verlustes im Amplitudenbereich ist. Die Verschlechterung der Sprachwahrnehmung soll durch die Wellenformverzerrung im zeitlichen Bereich verursacht sein, da, wie Licklider[19] gezeigt hat, peak-clipping, welches ebenfalls die Signalamplitude reduziert, kaum das Sprachverständnis beeinflußt. Im zeitlichen Bereich vermindert sich das Nullinienplateau mit ansteigenden Signalpegeln sehr viel schneller, als bei der relativen Amplitudenreduktion mit ansteigenden Signalpegeln. Numerisch vermindert sich die unterbrochene Fortdauer des Nullinienplateaus ungefähr in der Größenordnung über einen Inputbereich von 15 dB (Kurve 3, Fig. 1 C).

Die Verminderung der zentralen Beschneidung im zeitlichen Bereich mit ansteigendem input-level ist eine geringe Hilfe für Patienten mit cochleären Fehlfunktionen: schnelle Sprachsignale erfahren in der Zeit schnelle Amplitudenfluktuationen über einen Bereich von ca. 30 dB. Für viele Patienten mit cochlearen Fehlfunktionen ist es schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, ihr TV oder Radio auf einen akzeptablen durchschnittlichen Pegel einzustellen. Das Signal ist entweder zu laut und unbehaglich in Hinsicht auf das Rekruitment, oder es ist zu verschwommen und das Sprachunterscheidungsvermögen ist ernsthaft vermindert.

Tonndorf hat dargelegt, daß die Effekte der Zilienpathologie, die auf Kopplung der Haarzellen mit der Deckmembran beruhen, mit den Effekten übereinstimmen, die durch Reduktion der Ziliensteifheit verursacht werden. Logische Grundlage ist nach Tonndorf folgender Sachverhalt: Wenn die pathologischen Zilien nur die Verbindung zu der membrana tectoria im Sinne eines Ausfalls der Reibungskopplung verlieren würden, würden die Wellenzüge in ihren Spitzen beschnit-

ten werden, und das würde, wie oben schon erwähnt, das Sprachunterscheidungsvermögen wenig beeinflussen. Bei Fehlfunktionen, bei denen das Auftreten pathologischer Zilien festgestellt wurde, wie beim endolymphatischen Hydrops und antibiotischen ototoxischen Läsionen, ist die Verschlechterung der Sprachwahrnehmung sehr ausgeprägt. Tonndorf folgert deshalb in seinem Artikel von 1980:

a) die Kopplung zwischen den Stereozilien und der Deckmembran ist von Natur aus elastisch
b) pathologische Zilien beeinflussen die Kopplung genauso wie bei der Reduktion der Ziliensteifheit, und bei beiden tritt derselbe Typ der zentralen Beschneidung auf.

Abschließend bemerkt Tonndorf, daß bei einigen Teilen seiner vorliegenden Hypothese die direkte experimentelle Nachprüfung fehlt. Hörverlust, Rekruitment, geringes Sprachunterscheidungsvermögen und Ohrgeräusche kann erklärt werden auf Grund eines gemeinsamen Phänomens: Zilienkopplung. Dies ist nicht notwendigerweise die ausschließliche Ursache nach Tonndorf, da er 1977[38] in einer Arbeit über dasselbe Thema zusätzlich zum center-clipping als Ursache für die schlechte Sprachverständlichkeit noch eine Maskierung durch Tieftongeräusche annahm.

4. Nulldurchgangsverzerrung (center-clipping)

Bei cochleären Störungen des Innenohres ist nach Tonndorf die Nulldurchgangsverzerrung für das Sprachverständnis bedeutsam. Bei der Nulldurchgangsverzerrung bleibt die Frequenz gleich, die Amplitude der Sinuswelle wird kleiner. Durch das center-clipping wird der zentrale Teil der Welle eliminiert. Bei starker Nulldurchgangsverzerrung wird die Sprache verstümmelt, die Wörter klingen nicht mehr wie verständliche Sprache, sondern mehr wie atmosphärisches Rauschen[20].

Durch diese Nulldurchgangsverzerrung kann beim Normalhörenden ein Rekruitment zum Teil nachgeahmt werden[38], d.h. es wird die Sprache so verzerrt, daß eine Innenohrschwerhörigkeit simuliert wird, so wie es Raichle[26] in seiner Dissertationsarbeit untersucht hat.

Raichle hat 30 normalhörende Probanden mit nulldurchgangsverzerrtem Freiburger Wörtertest geprüft. Die Wortgruppen waren schwach, mittel und stark verzerrt. Sie wurden mit Lautstärkepegeln von 30 dB, 45 dB und 60 dB dargeboten. Als Ergebnis wurde dabei mit zunehmender Verzerrung eine Abnahme der Sprachverständlichkeit beobachtet. 11 Probanden hat Raichle mit einem Lautstärkepegel von 75 dB geprüft, um zu zeigen, daß durch größere Lautstärken keine Verbesserung der Sprachverständlichkeit erzielt werden kann (Tab. 11). Bei mittlerer Verzerrung wurde mit 75 dB noch 70 % Verständnis gegenüber 60 dB und 58 % Verständnis erreicht; bei starker Verzerrung wurde jedoch schon bei einem Pegel von 60 dB mit 45 %tiger Verständlichkeit ein maximales Verständnis erreicht, da bei 75 dB die Verständlichkeit auf 42 % abfiel. Raichle konnte nachweisen, daß nicht, wie Tonndorf meint, die fehlende Information in den Nulldurchgängen entscheidend ist, sondern die Pegelverminderung durch die Nulldurchgangsverzerrung. Die leisen Anteile der Sprache werden dabei gelöscht. Es bleiben öfter nur die lauten Anteile eines Wortes übrig, die zum Verständnis nicht ausreichen.

In vorliegender Arbeit soll der Einfluß von Nulldurchgangsverzerrungen auf das Sprachverständnis von Innenohrschwerhörigen untersucht werden. Zusätzlich zur bestehenden gehörten Verzerrung des Patienten wird diesem noch ein nulldurchgangsverzerrter Freiburger Wörtertest dargeboten, so daß der Patient doppelt verzerrte Wörter verarbeiten muß.

Im Bezug zur Normkurve bedeutet dies:

Die Differenz von normaler Sprache und verzerrter Sprache müßte beim Innenohrschwerhörigen größer sein als beim Normalhörenden, weil zusätzlich durch das Gehör eine Verzerrung hinzukommt.

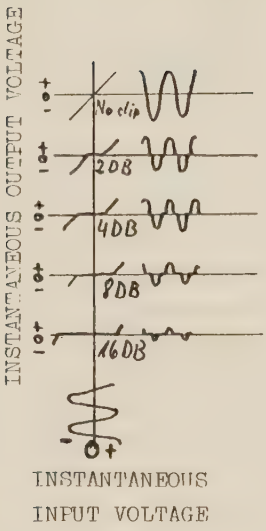


Abbildung 2

Center-clipping nach Licklider[20]

Der Anstieg der Nulldurchgangsverzerrung vermindert die Amplitude

III. EXPERIMENTELLER TEIL

A. Versuchsteil

1. Patientenauswahl

a) Allgemeine Kriterien

Die Patienten sind zwischen 14 und 71 Jahre alt. Bei allen Patienten besteht eine Schallempfindungsschwerhörigkeit, die unterschiedlicher Genese ist, wie z.B.: Acusticusneurinom, M. Menière, Hörsturz oder Akustisches Trauma. Die Testdauer für einen Patienten betrug 35 - 40 min,,jeweils für ein Ohr. Einige Patienten zeigten nach dieser Zeit schon erste Ermüdungserscheinungen. Alle Patienten waren sehr kooperativ, und bemühten sich alles zu verstehen.

b) Auswahl nach audiometrischen Daten

Bei allen Patienten war ein Tonschwellenaudiogramm und ein Sprachaudiogramm (Freiburger Wörtertest) vorhanden. Im Tonschwellenaudiogramm konnten die Patienten einen Hörverlust im Bereich von 30 - 80 dB haben, mußten aber anhand des Sprachaudiogramms noch eine Wortverständlichkeit über 50 % aufweisen. Manchmal waren diese Kriterien bei einem Patienten für beide Ohren erfüllt, so daß beide Ohren getestet wurden.

2. Versuchsdurchführung

Das Ohr, das obigen Kriterien entsprach, wurde nach dem Freiburger Wörtertest der Gruppen 1 - 10 getestet. Über Kopfhörer wurden dem entsprechenden Ohr die Wortgruppen dargeboten. Das andere Ohr wurde mit einem weißen Rauschen vertäubt, wenn der Unterschied zum getesteten Ohr mehr als 50 dB betrug, damit auf diesem Ohr nicht übergehört wurde. Der Pegel, mit dem das getestete Ohr beschallt wurde, war von Patient zu Patient verschieden, entsprach in seinem normalen Sprachaudiogramm

einer Verständlichkeit von ca. 70 - 80 %.

Der durchschnittliche Prüfpegel (absolut) der 20 Patienten betrug 95,25 dB (SPL).

Tabelle der Prüfpegel (absolut)

Patient	Pegel	Patient	Pegel
1	80 dB	11	80 dB
2	100 "	12	100 "
3	110 "	13	90 "
4	100 "	14	100 "
5	90 "	15	100 "
6	70 "	16	100 "
7	80 "	17	110 "
8	90 "	18	110 "
9	85 "	19	100 "
10	110 "	20	100 "

Der Patient wurde angewiesen:

a) alle Wörter sofort nachzusprechen
b) wenn er nur Silben oder Laute versteht, diese sofort nachzusprechen
c) er kann raten und kombinieren, wenn er ein Wort nicht verstanden hat

Die erste Gruppe des Freiburger Wörtertests war zum Einhören bestimmt. Sie war ebenfalls eine Konzentrationsübung für die nachfolgenden Gruppen.
Anschließend wurde auf 3 Tonbändern A, B, C, die Gruppen 2 - 10 des Freiburger Wörtertests in unterschiedlichen Verzerrungsgraden (schwach, mittel, stark) dem ausgewählten Ohr dargeboten.

Für den 1. Patienten sah das Schema folgendermaßen aus:

Tonband A: Gruppe 2 (schwach verzerrt), 5 (mittel verzerrt), 8 (stark verzerrt)
Tonband B: Gruppe 5, 8, 2 (stark, schwach, mittel)
Tonband C: Gruppe 8, 2, 5 (mittel, stark, schwach)

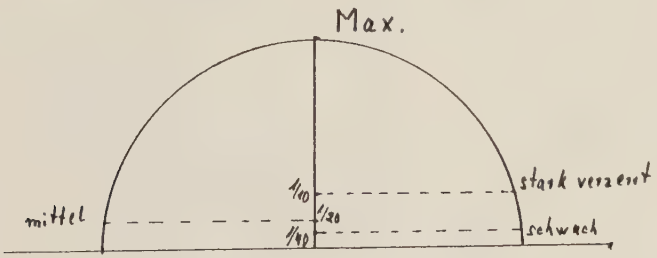
Für den 2. Patienten:

Tonband A: Gruppe 3, 6, 9 (schwach, mittel, stark)
Tonband B: Gruppe 6, 9, 3 (stark, schwach, mittel)
Tonband C: Gruppe 9, 3, 6 (mittel, stark, schwach)

usw. So wurde bei jedem Tonband die angebotene Wortgruppe in unterschiedlicher Reihenfolge verzerrt dem Patienten dargeboten, um eventuelle Einflüsse von der Reihenfolge des Verzerrungsgrades und der Ungleichheit der Wortgruppen untereinander weitgehendst auszuschließen.

Abbildung 3

Definition der Verzerrung



Schwache Verzerrung: Maximum der Sinuswelle um 1/40 reduziert
Mittlere " : " " " um 1/20 "
Starke " : " " " um 1/10 "

Programm zur Durchführung der Untersuchungen

Tonband A

Gruppe 1		zum Einhören
2. 3. 4.	┐ ├	schwach verzerrt
5. 6. 7.	┐ ├	mittel verzerrt
8. 9. 10.	┐ ├	stark verzerrt

Tonband B

Gruppe 1		zum Einhören
5. 6. 7.	┐ ├	stark verzerrt
8. 9. 10.	┐ ├	schwach verzerrt
2. 3. 4.	┐ ├	mittel verzerrt

Tonband C

Gruppe 1		zum Einhören
8. 9. 10.	┐ ├	mittel verzerrt
2. 3. 4.	┐ ├	stark verzerrt
5. 6. 7.	┐ ├	schwach verzerrt

Sprachaudiogramm nach Freiburger Wörtertest

einsilbige Wörter nach DIN 45 621

1.	Ring Spott Farm Hang Geist Zahl Hund Bach Floh Lärm Durst Teig Prinz Aas Schreck Nuß Wolf Braut Kern Stich
2.	Holz Ruß Mark Stein Glied Fleck Busch Schloß Bart Ei Werk Dach Knie Traum Paß Kunst Mönch Los Schrift Fall
3.	Blatt Stift Huhn Zweck Aal Furcht Leim Dorf Tal Kerl Schutz Wind Maus Reif Bank Klee Stock Wuchs Mist Gras
4.	Schnee Wurst Zahn Pest Griff Laub Mund Grab Helt Kopf Reiz Frist Drang Fuß Öl Schleim Takt Kinn Stoß Ball
5.	Punkt Ziel Fest Darm Schein Torf Lamm Wehr Glas Hut Spind Pfau Block Arm Neid Stroh Wurf Rest Blick Schlag
6.	Seil Pfand Netz Flur Schild Ochs Draht Hemd Schmutz Rat Tau Milch Rost Kahn Tier Brot Dunst Haar Feld Schwein
7.	Spiel Moos Lachs Glut Erz Baum Sand Reich Kuh Schiff Wort Hecht Mann Bruch Schopf Fels Kranz Teich Dienst Star
8.	Luft Band Kost Ski Feind Herr Pflug Tal Gift Raum Ernst Zeug Fach Groll Speck Sitz Moor Last Krach Schwung
9.	Schmerz Thron Eis Funk Baß Rind Lehm Grog Blei Markt Schilf Hut Zank Korb Lauf Dank Sarg Kies Schnur Pech
10.	Horn Pfeil Kamm Turm Spieß Laus Recht Zopf Schall Mais Fell Gramm Ohr Sieb Pracht Lump Gips Bad Sprung Dreck

Tonschwellenaudiogramm

Universitäts-HNO-Klinik
74 Tübingen • Silcherstraße 5

Name:

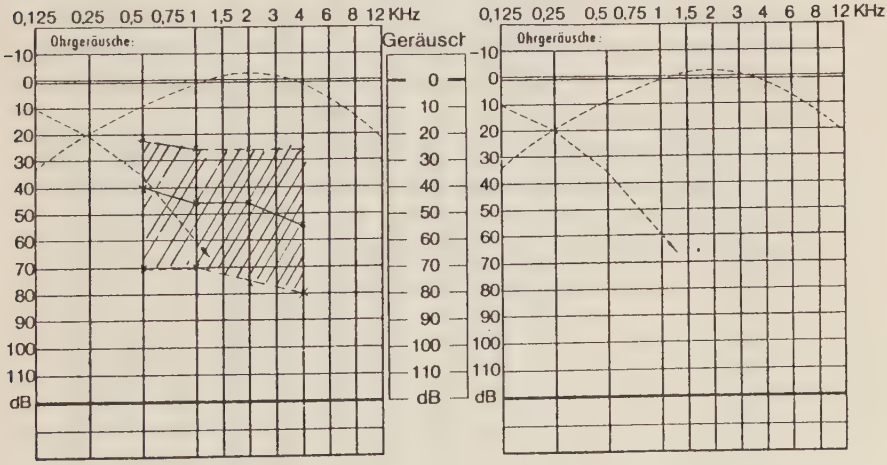
Vorname:

geb.:

		Weber C^2		
		Weber C^3		
		Rinne C^2		
		Rinne C^3		
		Flspr. Z		
		Uggspr. Z		

Datum:

Prüfer:



Rechtes Ohr **Linkes Ohr**

—— mittlerer Hörverlust und Streubereich bei Innenohrschwerhörigkeit aus vorliegender Untersuchung

3. Versuchsaufbau und Auswertungsmodus

Die audiometrischen Daten wurden mit einem Audiometer von der Fa. Siemens, Beomat 4 000 SR, ermittelt.

Mit Hilfe des Prozeßrechners Plurimat S von Intertechnique wurden die Gruppe 1 - 10 des Freiburger Sprachtests verzerrt. Die Nulldurchgangsverzerrung wurde in der Form realisiert, daß jeweils vom Maximum eines einzelnen Wortes aus alle Amplitudenwerte, die 1/10, 1/20 und 1/40 des Maximalwertes betrugen, auf null gesetzt wurden. Diese Manipulation entspricht zwar nicht genau dem Modell Tonndorfs. Der wesentliche Effekt, nämlich der Verlust der Nulldurchgangsinformation, ist auch hier erreicht.

Im Sprachaudiogramm wurde ein Wort als richtig verstanden gewertet, wenn es vollständig und richtig nachgesprochen wurde. Hat der Patient etwas ähnliches oder anderes nachgesprochen, wurde das Wort als nicht verstanden gewertet. Es wurde notiert, was der Patient bei den einzelnen Wörtern verstanden hat. Zusätzlich zu der Auswertung nach Wörtern, wurde auch nach Lauten ausgewertet, um den unterschiedlichen Einfluß der Verzerrung auf das Lautverständnis analysieren zu können.
Zur Lautauswertung wurden die Wörter des Freiburger Tests in Lautschrift übertragen und nach der Lautschrifttafel von Siebs, Deutsche Aussprache, 19. Auflage, Walter de Gruyter u. Co., Berlin 1969 ausgewertet.

1. rin, ʃpɔt, farm, haz, gaɣst, ʦa:l, hunt, bax, flo:, lɛrm, durst, taɣk, ptints, a:s, ʃrɛk, nus, vɔlf, bragt, kɛrn, ʃtiʃ

2. hɔlʃ, ru:s, mark, ʃtaɣn, gli:t, flɛk, buʃ, ʃlɔs, ba:rt, ae, vɛrk, dax, kni:, traɣ, pas, kunst, maɣŋ, lo:s, ʃrift, fal

3. blat, ʃtift, ho:n, ʦvɛk, a:l, furst, laɣm, dɔrf, ta:t, kɛrl, ʃuʦ, vint, maɔs, raɣt, baŋk, kle:, ʃtɔk, vuks, mist, gra:s

4. ʃne:, vurst, ʦa:n, pɛst, grif, lapp, munt, gra:p, hɛft, kɔpf, raɣʦ, frist, dran, fu:s, ø:l, ʃlaɣm, takt, kin, ʃto:s, bal

5. punkt, ʦi:l, fɛst, darm, ʃaɣn, tɔrt, lam, ve:r, gle:s, hait, ʃpint, pfag, blɔk, arm, naɣt, ʃtro:, vurf, rɛst, blik, ʃla:k

6. zaɣl, pfant, nɛʦ, flu:r, ʃilt, ɔks, dra:t, hɛmt, ʃmuʦ, ra:t, tag, milʦ, rast, ka:n, ti:r, bro:t, dunst, ha:r, fɛlt, ʃvaɣn

7. ʃpi:l, mo:s, laks, glu:t, e:rʦ, baɔm, zant, raɣs, ku:, ʃif, vɔrt, hɛgt, man, brux, ʃapt, tɛls, krantʦ, taɛg, di:nst, ʃta:r

8. luft, bant, kast, ʃi:, faɛt, hɛr, ptlu:k, ta:l, gift, ragm, ɛrnst, ʦɔyk, tax, grɔl, ʃpɛk, ziʦ, mo:r, last, krax, ʃvaŋ

9. ʃmɛrʦ, tro:n, aɛs, tuŋk, bas, rint, le:m, grɔk, blaɣ, markt, ʃilt, hu:t, ʦaŋk, kɔrp, laɣf, daŋk, zark, ki:s, ʃne:r, pɛs

10. hɔrn, ptaɣl, kam, turm, ʃpi:s, laɣ:s, rɛgt, ʦɔpf, ʃal, maɛs, tɛl, gram, o:r, zi:p, praxt, lamp, gips, ba:t, ʃpraŋ, drɛk

Tabelle 1

Aufschlüsselung der einzelnen Wörter des Freiburger Hörtests der Gruppen 1 - 10 nach Lauten (Siebs, Deutsche Aussprache)

Tabelle 2: Lautschlüssel der Wörter des Freiburger Wörtertests mit phonetischer Einteilung

Vokale

i = Igel
a = Arm
e = Weg
u = Uhr
o = Ofen
ɔ = Ort
œ = Mönch
ø = Öl
y = Glück
ɛ = Geld

Diphtonge

a͡e = Eimer
ɔ͡y = Heu
a͡o = Raum

Fließlaute

l = Lump (Seitenlaut)
r = Reck (Schwinglaut)

Nasenlaute

m = Mann
n = Nest
ŋ = Klang

Verschlußlaute

p = Pult (stimmlos)
t = Tat (")
k = Kraft(")
b = Bach (stimmhaft)
d = Dach (")
g = Gruß (")

Reibelaute

x = Dach (stimmlos)
f = Fuß (")
h = Haus (")
ç = Licht(")
s = Saft (")
ʃ = Schiff(")
z = Sohn (stimmhaft)
v = Wahl (")

	f	s	ʃ	ʂ	x	h	v	z	p	t	k	b	d	g	m	n	ŋ	l	r	œ	ɑ	ɔ	y	i	e	a	o	ɔ	u	ɛ	ʏ	ø	œ	
1.	3	6	3	1	1	2	1	0	2	9	3	2	1	1	2	4	2	4	8	2	1	0	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0		75
2.	3	6	4	1	1	1	1	0	1	7	5	2	1	1	3	4	0	6	6	2	1	0	3	0	5	1	2	3	2	0	0	1		73
3.	4	6	3	1	0	1	3	0	0	11	6	2	1	1	3	2	1	5	5	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0		75
4.	5	7	3	0	0	1	1	0	4	10	3	1	1	2	2	4	1	4	6	2	1	0	3	1	5	1	1	3	2	0	1	0		75
5.	5	4	4	0	0	1	2	0	3	8	4	2	1	1	3	3	1	6	7	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0		75
6.	3	5	3	1	0	2	1	1	1	13	2	1	2	0	3	5	0	5	7	2	1	0	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0		75
7.	3	6	4	3	1	1	1	1	2	9	3	2	1	1	3	4	0	4	6	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0		75
8.	5	5	3	0	2	1	1	1	2	10	5	1	0	2	2	3	1	5	6	1	1	1	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0		75
9.	3	5	3	1	0	1	0	1	2	6	8	2	1	1	3	3	3	4	8	2	1	0	3	1	5	1	2	3	2	0	0	0		75
10.	3	5	3	1	1	1	0	1	7	5	2	1	1	2	5	1	1	5	8	2	1	0	3	0	5	1	2	3	3	0	0	0		74

Tabelle 3: Anzahl der einzelnen Laute der Gruppen 1 - 10 des Freiburger Hörtests

B) Ergebnisse

1. Verständlichkeit der Wörter

Die Verständlichkeit der Wörter nimmt bei Innenohrschwerhörigen mit steigender Verzerrung ab (Abb. 4, Tab. 4a + 4b). Bei schwacher Verzerrung ist die Verständlichkeit noch über 50 %, bei mittlerer Verzerrung wird noch 45 % verstanden, und bei starker Verzerrung sinkt die Verständlichkeit auf 32,9 % ab.
Bei statistischer Auswertung, ob es zwischen den einzelnen Verzerrungsgraden signifikante Unterschiede gibt, wurde folgendes Ergebnis erzielt: Nach dem Friedmann-Test ist der Unterschied zwischen den einzelnen Verzerrungsgraden hochsignifikant ($p < 0{,}01$), d.h. bei mittlerer Verzerrung wird signifikant schlechter gehört als bei schwacher Verzerrung, und bei starker Verzerrung wird signifikant schlechter verstanden als bei mittlerer Verzerrung.
Ein Vergleich mit Raichles[26] Patientengut (Abb. 5, Tab. 5) ergibt, daß die Innenohrschwerhörigen gegenüber den Normalhörenden in der Verständlichkeit unter der Gruppe der Normalhörenden mit einem Pegel von 45 dB liegt. Bei den Normalhörenden ergibt sich ebenfalls eine direkte Beziehung zwischen Verzerrung und Verständlichkeit, d.h. bei steigender Verzerrung fällt das Verständnis ab.

2. Verständlichkeit der Laute

Bei der Verständlichkeit der Laute ergibt sich ebenfalls eine Beziehung zwischen Verständlichkeit und Verzerrung (Abb. 6, Tab. 6a + 6b). Hier macht sich die Verzerrung nicht so stark bemerkbar, wie beim Wortverständnis, da bei starker Verzerrung noch 60 % der Laute verstanden werden.

Ein Vergleich mit Raichles Auswertung bei Normalhörenden (Abb. 7, Tab. 7): Bei seinen Probanden ergab sich ebenfalls ein Abfall des Lautverständnisses mit steigender Verzerrung, wobei die Normalhörenden noch ein besseres Lautverständnis als die Innenohrschwerhörigen haben.

Abbildung 4: Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Verzerrung bei Innenohrschwerhörigen (n = 20 Patienten)

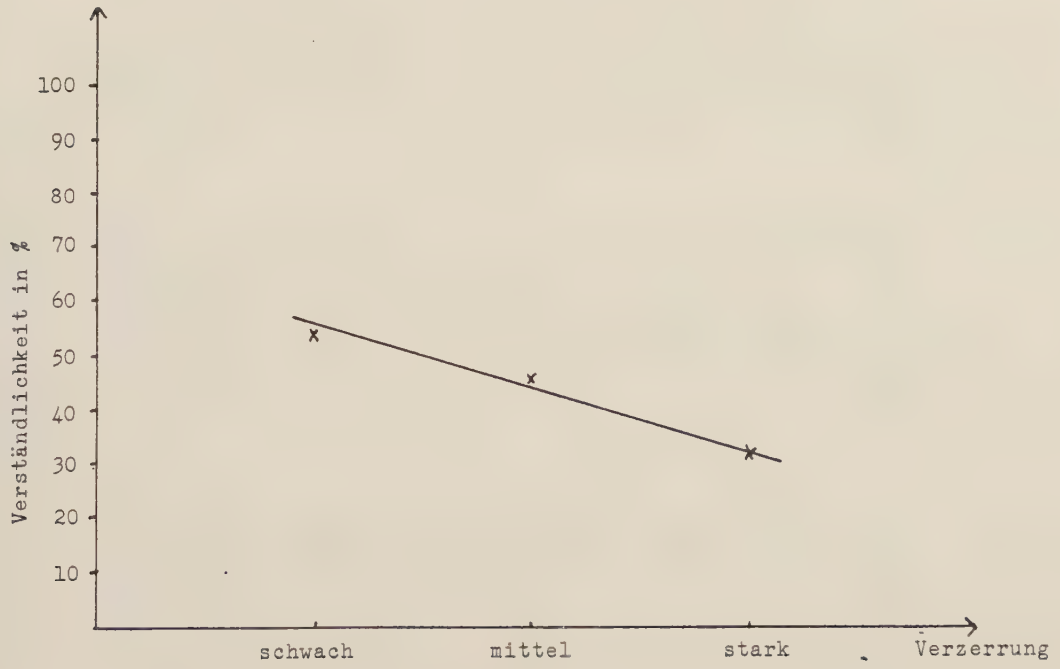


Tabelle 4a: Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Verzerrung bei n = 20 Patienten (Innenohrschwerhörigkeit); pro Patient und Verzerrungsgrad je 3 Gruppen; pro Gruppe 20 Wörter

schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt		
16	15	8	9	13	10	7	7	7
5	8	11	9	4	6	2	7	4
13	4	9	8	7	7	2	5	4
9	7	12	9	7	5	5	7	8
12	9	7	5	8	6	5	5	7
8	11	12	11	11	12	10	10	11
5	5	3	5	6	4	3	3	6
12	9	9	7	11	8	3	2	9
19	17	15	12	16	15	6	7	13
15	11	13	10	9	10	4	8	4
9	13	9	7	9	13	10	6	9
7	7	12	2	7	5	1	3	5
12	13	10	5	7	5	2	6	7
13	10	11	9	11	9	4	9	7
10	12	10	7	10	6	5	4	6
7	8	6	5	8	9	7	5	3
8	10	13	11	6	7	3	5	5
9	13	16	9	12	10	8	7	8
16	13	15	13	17	9	9	12	17
13	12	13	17	12	12	10	11	12
10,9	10,35	10,7	8,5	9,5	8,4	5,3	6,55	7,6

Tabelle 4b: Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Verzerrung bei n = 20 Patienten in %

schwach verzerrt	mittel verzerrt	stark verzerrt
50 %	43,3 %	23,3 %
85 %	71,6 %	43,3 %
51,6 %	48,3 %	41,6 %
43,3 %	26,6 %	15 %
21,6 %	25 %	20 %
46,6 %	35 %	28,3 %
51,6 %	56,6 %	51,6 %
46,6 %	31,6 %	28,3 %
63,3 %	68,3 %	55 %
51,6 %	40 %	21,6 %
63,3 %	51,6 %	38,3 %
35,0 %	36,6 %	25 %
56,6 %	43,3 %	33,3 %
53,3 %	38,3 %	25 %
65 %	31,6 %	25 %
36,6 %	53,3 %	35 %
41,3 %	31,6 %	21,6 %
73,3 %	36,6 %	18,3 %
58,3 %	65 %	63,3 %
Ø 53,3 %	Ø 45 %	Ø 32,9 %

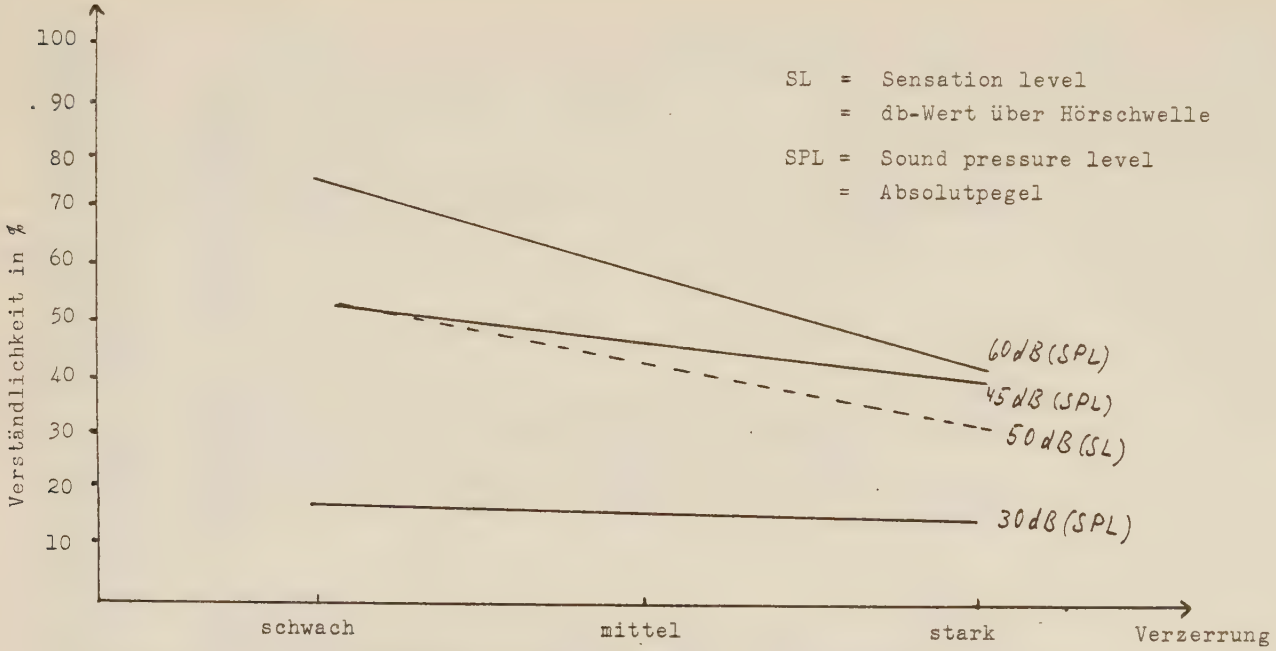


Abbildung 5: ——— Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Verzerrung bei Normalhörenden (19 Versuchspersonen)

- - - - Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Verzerrung bei Innenohrschwerhörigen (20 Versuchspersonen)

Tabelle 5: Nach Wörtern ausgewertet, pro Gruppe 20 Wörter, n = 19 Probanden. Kombination Verzerrung/Lautstärke (nach Raichle)

schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt			Probanden
60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB	1 - 19
17	13	1	11	9	3	6	8	2	
13	12	7	15	10	5	12	8	5	
16	12	3	15	9	2	14	7	2	
17	15	3	11	11	4	10	8	3	
16	14	4	12	9	3	9	9	5	
16	10	3	10	10	4	7	6	1	
17	15	2	13	10	3	8	6	5	
17	9	2	18	13	6	6	6	3	
18	11	5	15	11	5	6	9	8	
16	10	2	15	10	2	6	10	3	
12	9	3	15	11	1	7	9	2	
19	11	5	14	13	7	8	11	6	
13	10	1	10	12	4	8	6	5	
10	7	3	12	8	0	7	9	2	
11	9	6	13	9	3	7	7	2	
12	5	4	12	7	3	9	5	2	
13	10	7	10	11	4	9	11	2	
12	10	3	15	7	2	10	9	2	
14	10	4	14	7	1	11	8	1	
14,7	10,6	3,6	13,2	9,8	3,3	8,4	8,0	3,2	
73%	53%	18%	66%	49%	16%	42%	40%	16%	

Abbildung 6: Verständlichkeit der Laute in Abhängigkeit der Verzerrung bei Innenohrschwerhörigen (n = 20 Patienten)

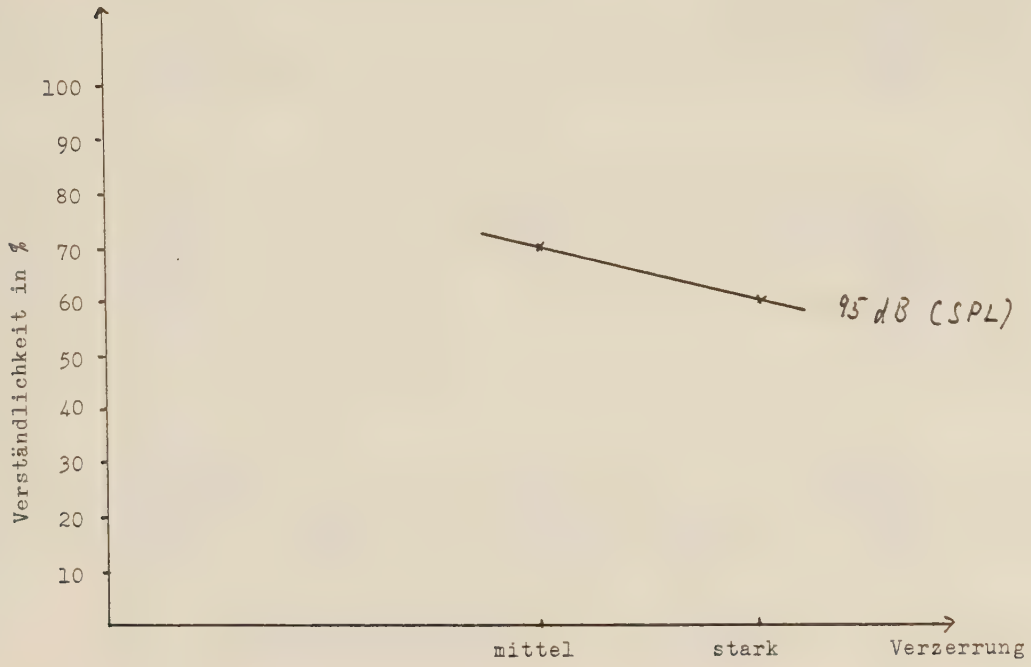


Tabelle 6a: Nach Lauten ausgewertet, bei n = 20 Patienten bei mittlerer Verzerrung. Von den 3 Wortgruppen pro Patient wurde die Gruppe ausgewertet, die vom prozentualen Verständnis in der Mitte lag.

	gesendet : empfangen	prozentuale Berechnung	Anzahl nicht verstanden / Anzahl verstanden
a	110 : 101	91,8 %	9/100 = 8,9
e	14 : 12	85,7 %	2/12 = 16,6
i	66 : 61	92,4 %	5/61 = 8,2
o	22 : 20	90,9 %	2/20 = 10
ɔ	44 : 34	77,3 %	10/34 = 29,4
u	66 : 59	89,4 %	7/59 = 11,9
ɛ	50 : 40	80 %	10/40 = 25
ø			
oe	3 : 1		
ae	41 : 30	73,2 %	9/30 = 30
ao	22 : 18	81,8 %	4/18 = 2 ,2
ɔy	3 : 2		
b	38 : 16	42,1 %	22/16 = 137,5
d	19 : 5	26,3 %	14/5 = 280
g	28 : 8	28,6 %	20/8 = 250
p	56 : 27	48,2 %	29/27 = 107,4
t	162 : 101	62,3 %	61/101 = 60,4
k	115 : 78	67,8 %	37/78 = 47,4
s	115 : 46	40 %	69/46 = 150
z	16 : 10	62,5 %	6/10 = 60
ʃ	74 : 65	87,3 %	9/65 = 13,8
ʒ	23 : 17	73,9 %	6/17 = 35,3
x	16 : 4	25	12/4 = 300
h	21 : 9	42,85%	12/9 = 133
l	103 : 75	72,8 %	28/75 = 37,3
m	66 : 53	80,3 %	13/53 = 24,5
n	65 : 56	86,15%	9/56 = 16
ŋ	30 : 19	63,3 %	11/19 = 57,9
r	153 : 139	90,8 %	14/139 = 10,1
v	16 : 14	87,5 %	2/14 = 14,3
f	77 : 24	81,2 %	53/24 = 220,8
	1634 : 1144		

Bei mittlerer Verzerrung ergibt sich $\frac{\text{empfangene}}{\text{gesendete}}$ Laute eine 70 % Verständlichkeit der Laute bei Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit

Tabelle 6b: Nach Lauten ausgewertet, bei n = 20 Patienten bei starker Verzerrung. Eine Gruppe/Patient

Laute	gesendet : empfangen	Anzahl nicht verstanden / Anzahl verstanden
a	100 : 94	6/94 = 6,4
e	12 : 9	3/9 = 33
i	60 : 48	12/48 = 25
o	20 : 16	4/16 = 25
ɔ	39 : 32	7/32 = 22
u	60 : 42	18/42 = 43
ɛ	48 : 38	10/38 = 26
ø		
oe		
y		
ae	35 : 28	7/28 = 25
ao	20 : 13	7/13 = 54
oy	3 : 2	
b	30 : 14	16/14 = 114,3
d	18 : 3	15/3 = 500
g	25 : 5	20/5 = 400
p	44 : 20	24/20 = 120
t	176 : 86	90/86 = 104,6
k	102 : 43	59/43 = 137,2
s	107 : 31	76/31 = 245,2
z	13 : 6	7/6 = 116,6
ʃ	65 : 38	27/38 = 71
ç	19 : 6	13/6 = 216
x	13 : 4	9/4 = 225
h	22 : 8	14/8 = 175
l	96 : 71	25/71 = 35,2
m	58 : 41	17/41 = 41,5
n	60 : 43	17/43 = 39,5
ŋ	19 : 13	6/13 = 46,2
r	128 : 113	15/113 = 13,3
v	26 : 20	6/20 = 30
f	77 : 17	60/17 = 353
	1495 : 904	

Bei starker Verzerrung ergibt sich $\frac{\text{empfangene}}{\text{gesendete}}$ Laute eine 60,5 % Verständlichkeit der Laute bei Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit.

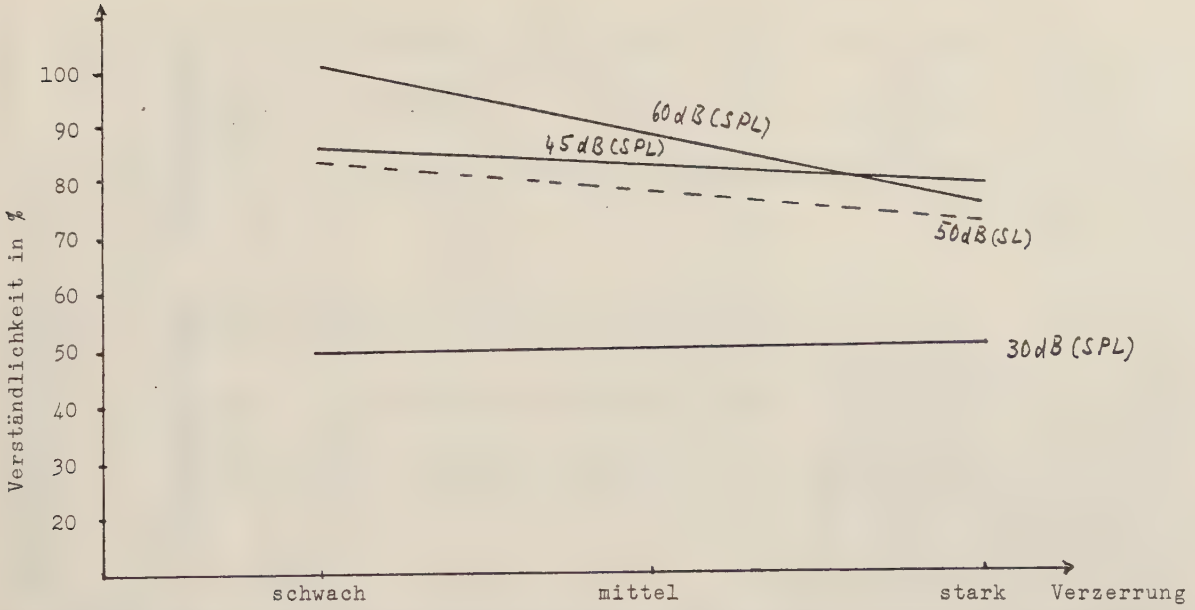


Abbildung 7: ——— Verständlichkeit der Laute in Abhängigkeit von der Verzerrung bei Normalhörenden (n = 19 Versuchspersonen)

- - - - Verständlichkeit der Laute in Abhängigkeit von der Verzerrung bei Innenohrschwerhörigen (n = 20 Patienten)

Tabelle 7: Nach Lauten ausgewertet, bei n = 19 Probänden
Kombination Verzerrung/Lautstärke
(nach Raichle)

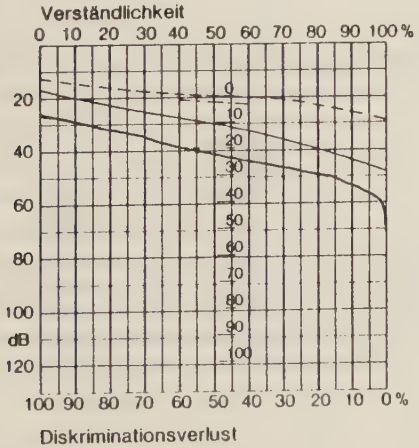
schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt		
60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB	60dB	45dB	30dB
70	59	4	54	56	19	36	51	25
61	58	44	66	51	37	62	54	48
69	53	25	66	51	25	59	51	24
69	61	25	57	60	25	48	52	34
68	62	26	59	51	26	47	57	38
69	51	27	50	49	32	48	50	33
69	60	22	57	60	34	38	49	44
70	53	35	71	59	45	37	41	31
67	60	38	60	56	37	32	45	37
68	57	32	67	50	28	34	52	33
54	54	14	65	51	19	34	48	12
72	64	35	68	59	46	47	54	35
65	49	9	60	56	31	50	47	24
57	55	13	59	53	6	58	51	16
59	50	30	62	57	31	57	51	29
57	37	26	56	45	18	53	38	20
64	61	38	56	56	43	56	50	37
65	58	29	65	43	23	56	50	23
64	58	35	66	52	23	62	53	27
65,1	55,8	26,7	61,3	53,4	28,8	48,0	49,7	30,0
89%	76%	37%	84%	73%	40%	66%	68%	41%

3. Erstellung einer eigenen Normkurve

Um den Vergleich der Verzerrungen bei Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit zu Normalhörenden in Bezug auf die Normalkurve herzustellen, wurde eine eigene Normkurve aus dem Patientengut der Universitäts-Hals-Nasen-Ohren-Klinik erstellt.

Von 40 Normalhörenden wurde eine eigene Normkurve erstellt. Diese Normalhörenden durften im Tonaudiogramm im Bereich von 125 - 8 000 Hz höchstens einen Hörverlust bis 15 dB haben.

Gemessen wurde die Verständlichkeit in % im Sprachaudiogramm bei Pegeln von 40 dB, 50 dB, 60 dB und 70 dB bei Personen zwischen 15 - 50 Jahren. Grund für eine eigene Normkurve ist die unterschiedliche Testumgebung. Ebenso wirkt sich die Qualität der Testapparatur aus, ob sie älteren Datums ist oder nicht. Entscheidend sind ebenfalls die Personen. Sind sie jünger und überdurchschnittlich intelligent, dann ist ihr Hörvermögen und Kombinationsvermögen besser, als bei älteren, weniger aufnahmebereiten Personen.
Anhand unserer Normkurve ergibt sich ein Verlust von 10 dB gegenüber der allgemeinen Normkurve (s. Abb. 8, Tab. 8).



Abbild 8
Eigene Normkurve

Tabelle 8: Eigene Normkurve

Verständlichkeit in % bei 40 Normalhörenden im Sprachaudiogramm bei unterschiedlichen Pegeln (Hörverlust im Tonaudiogramm im Bereich von 125 - 8 000 Hz bis max. 15 dB).

40 dB	50 dB	60 dB	70 dB
40	90	100	100
50	90	100	
50	50	85	100
40	80	100	100
45	85	100	100
	75	100	100
	85	100	100
	90	100	100
	85	100	100
		80	100
		95	100
	75	100	100
	75	100	100
	90	100	100
		85	100
	80	100	100
	85	100	100
	80	100	100
	80	100	100
	85	100	100
	90	100	
	95	100	
	80	100	100
	100		
	70	100	
	60	100	
	75	100	
	85	100	
	90		
	85	100	100
	85	100	100
	90	100	
	95	100	
		90	100
	65	90	100
	85	100	100
	90	100	100
	80	100	100
	85	100	100
∅ 45 %	∅ 83 %	∅ 98 %	∅ 100 %

4. Vergleich der Prüfpegel zwischen Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit und Normalhörenden

a) Um die Werte über die Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit der Verzerrung zwischen Normalhörenden (s. Raichles Dissertation Tübingen 1983) und Innenohrscherhörigen vergleichen zu können, ist es erforderlich, den Durchschnittspegel bei den 20 Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit zu errechnen.
Es wurde jeweils ein Prüfpegel pro Patient bei verschiedenen Verzerrungsgraden benützt. Dieser Prüfpegel minus dem Hörverlust des Patienten ergibt den Relativpegel, oder auch Sensation Level (= dB-Wert über dem Hörverlust). Der Hörverlust des Patienten wurde aus dem Tonaudiogramm bei 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz errechnet, und aus diesen 4 Werten wurde der Mittelwert gebildet (Tab. 9).

Der Relativpegel (SL) beträgt:

durchschnittl. Prüfpegel - durchschnittl. Gesamthörverlust
95,25 - 45,94 = 49,31 dB (SL)

b) Ein Vergleich zwischen der Verständlichkeit bei Normalhörenden und Innenohrschwerhörigkeit-Patienten bei starker Verzerrung (Tab. 4a und 5) ergibt nach statistischer Auswertung folgendes Ergebnis: Nach dem t-Test (unabhängige Stichprobe) hört der Innenohrschwerhörige signifikant schlechter bei starker Verzerrung als der Normalhörende in Raichles Arbeit bei einem Pegel von 45 dB und starker Verzerrung ($t = -2{,}18$; $p < 5\%$), und bei einem Pegel von 60 dB und starker Verzerrung ($t = -2{,}55$; $p < 5\%$).
In Abbildung 9 geht die Kurve 'starke Verzerrung' bei einem Pegel von 45 dB bei 40 % Verständlichkeit in eine Gerade über, d.h. beim Innenohrscherhörigkeit-Patienten macht sich bei starker Verzerrung, bei einem Pegel von 49,31 dB (SL) und 33 % Verständlichkeit, kein Pegeleffekt mehr bemerkbar, d.h. bei höheren Lautstärken wird das Verständnis nicht besser.
Da beim Innenohrschwerhörigen schon bei 45 dB und starker

Verzerrung ein signifikanter Unterschied im Wortverständnis liegt, kann gefolgert werden, daß der Innenohrschwerhörigkeit-Patient unter der Kurve der starken Verzerrung ab 45 dB des Normalhörenden liegt. Schon ab diesem Bereich ergibt sich ein pegelunabhängiges Wortverständnis, oder anders ausgedrückt: selbst mit höheren Pegeln nimmt die Wortverständlichkeit nicht mehr zu. In Raichles Arbeit änderte sich bei Lautstärken über 60 dB in allen drei Verzerrungsgraden nichts mehr! Auch hier ergab sich ein pegelunabhängiger Effekt.

In Zahlen ausgedrückt hat der Innenohrschwerhörige gegenüber unserem normierten Wörtertest bei 50 dB ein Wortverständnisverlust von 50 % gegenüber dem Normalhörenden bei unverzerrter Sprache. Gegenüber dem Normalhörenden mit nulldurchgangsverzerrten Wörtertest ergibt sich bei 50 dB ein Verlust von ca. 7 %.

Tabelle 9: Bestimmung des durchschnittlichen Hörverlustes bei n = 20 Patienten

500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
45 dB	40 dB	45 dB	55 dB
70	70	75	65
55	55	45	40
45	55	50	60
35	35	30	25
20	35	40	50
25	35	50	70
30	25	25	30
20	35	35	40
50	50	55	70
45	40	40	55
45	40	30	30
50	50	35	35
35	50	55	60
35	50	50	65
35	45	60	75
35	40	50	65
40	35	35	40
40	55	60	46
40	50	50	80
795:20	890:20	915:20	1075:20
= 39,75 dB	= 44,5 dB	= 45,75 dB	= 53,75 dB

durchschnittlicher Gesamthörverlust 45,94

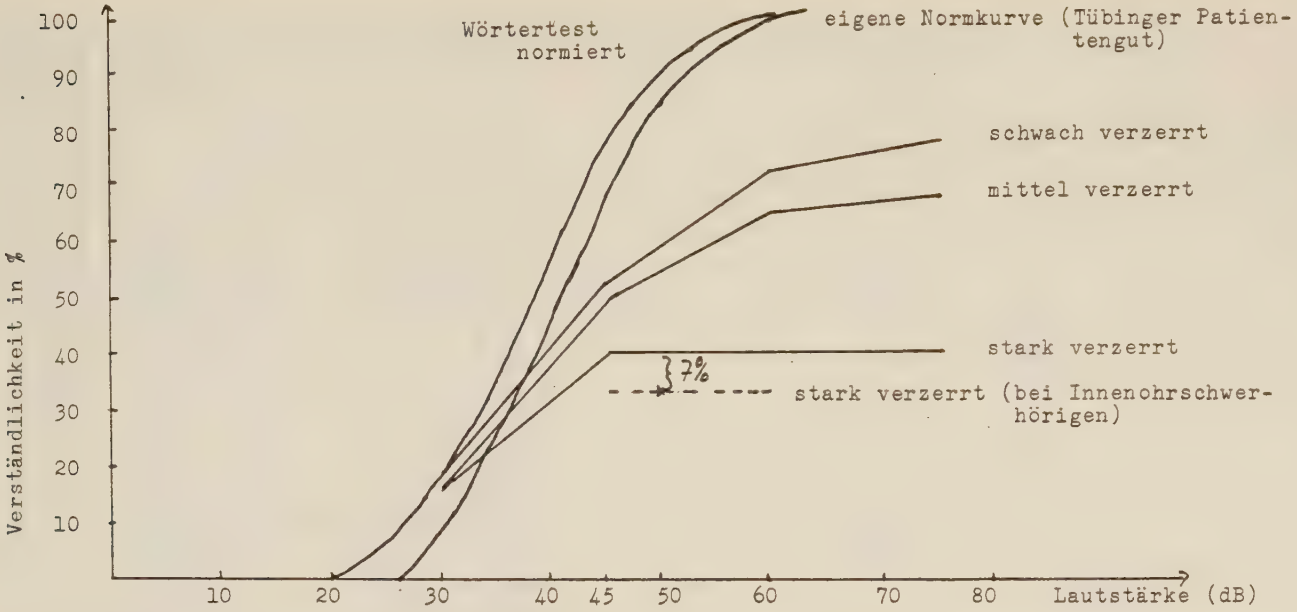


Abbildung 9: ——— Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit von der Lautstärke bei Normalhörenden (bis 60 dB mit n = 19, ab 60 dB mit n = 11 Versuchspersonen)

- - - - Verständlichkeit der Wörter in Abhängigkeit der Lautstärke bei Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit

Tabelle 10: Nach Wörtern ausgewertet, pro Gruppe 20 Wörter, bei n = 11 Probanden, Kombination Verzerrung/ Lautstärke (nach Raichle)

schwach verzerrt			mittel verzerrt			stark verzerrt		
75dB	60dB	45dB	75dB	60dB	45dB	75dB	60dB	45dB
16	15	12	12	9	9	8	7	10
17	18	9	11	11	10	11	8	6
16	18	10	14	13	13	10	9	7
17	17	13	18	16	12	9	7	10
18	17	11	17	14	11	7	10	9
16	14	9	16	12	10	8	13	8
13	15	9	12	10	12	8	8	7
16	13	6	13	11	9	6	11	9
14	13	9	14	12	11	10	10	8
14	14	13	12	10	10	7	9	11
14	14	13	11	9	9	8	7	7
15,5	15,3	10,4	13,6	11,5	10,5	8,4	9,0	8,4
78%	77%	52%	68%	58%	53%	42%	45%	42%

5. Einzelbetrachtung der Laute

Ähnlich wie bei den Normalhörenden in Raichles Arbeit werden die Konsonanten mit zunehmender Verzerrung immer schlechter verstanden (Abb. 10a und 10b, 11a und 11b), während die Vokale selbst bei starker Verzerrung noch relativ gut verstanden werden (Abb. 11a). Für das Wortverständnis sind die Konsonanten wichtig, die jedoch wegen ihrer geringen Intensität schon bei mittlerer Verzerrung sehr schlecht verstanden werden (Abb. 10a).

Lautverständnis in den einzelnen Wortgruppen

Wortgruppe 2 bei Innenohrschwerhörigkeit: (Vergleich: Normalhörende 2 bei 60 dB)
Die Konsonanten /T/in Traum und /f/ im Wort Fall werden schon bei schwacher Verzerrung nicht verstanden. Beim Wort Fleck verstehen 50 % der Patienten bei schwacher Verzerrung richtig, die anderen 50 % verstehen nicht richtig. Hier macht sich bei Innenohrschwerhörigkeit im Unterschied zu Normalhörenden (Raichles Arbeit) schon die schwache Verzerrung sehr stark bemerkbar.
Beim Wort Glied wird der Konsonant /G/ im Anlaut bei 50 % der Patienten überhaupt nicht verstanden, während die anderen 50 % der Patienten im Unterschied zu den Normalhörenden den Konsonanten /G/ selbst bei starker Verzerrung verstehen.
Der Konsonant /S/ im Wort Stein wird bei starker Verzerrung, ebenso wie bei den Normalhörenden, nicht mehr verstanden.
Los: Ebenso wie bei den Normalhörenden wird /s/ bei starker Verzerrung nur noch von einem Drittel der Patienten richtig gehört.
Paß: Das scharfe /ß/ wird bei schwacher Verzerrung nur von 50 % der Patienten verstanden, bei mittlerer Verzerrung nicht mehr.
Schloß: /S/ und /ß/ werden bei starker Verzerrung nicht mehr, und bei mittlerer Verzerrung nur teilweise verstanden.
Ruß: Das /ß/ wird bei schwacher Verzerrung nur teilweise,

bei mittlerer Verzerrung nicht mehr verstanden.

Mark: Ähnlich wie beim Normalhörenden wird öfter noch ein /t/ hinzugesetzt, dies jedoch schon bei schwacher Verzerrung. Bei mittlerer Verzerrung wird das Wort nicht mehr verstanden.

Zusammenfassung:

Ähnlich wie beim Normalhörenden, werden /T/ und /F/ im Anlaut bei schwacher Verzerrung nicht verstanden. Im Vergleich der anderen Laute zwischen Innenohrschwerhörigen und Normalhörenden, wie /ß/g/S/ macht sich die doppelte Verzerrung auf die Sprachverständlichkeit schon früher bemerkbar, d.h. bei geringen Verzerrungsstufen tritt bei Innenohrschwerhörigen schon ein größerer Hörverlust als bei Normalhörenden auf.

Wortgruppe 8 bei Innenohrschwerhörigen: (Vergleich: 8 bei 60 dB Normalhörenden)

/F/ in Feind und Fach wird bei schwacher Verzerrung teilweise nicht mehr verstanden, bei mittlerer nicht mehr.

Der /pf/Laut in Pflug wurde manchmal noch bei starker Verzerrung richtig geraten, größtenteils aber schon bei schwacher Verzerrung nicht mehr verstanden.

/G/ in Groll wurde von 50 % der Patienten bei mittlerer Verzerrung noch verstanden. /T/ in Tal wird bei schwacher Verzerrung von 2/3 der Patienten verstanden, bei mittlerer und starker Verzerrung nicht mehr. /P/ in Speck wird mit zunehmender Verzerrung schlechter gehört, bei starker Verzerrung nur noch von 50 % der Patienten. /H/ in Herr wird teilweise schon bei schwacher Verzerrung unhörbar. /T/ in Last wird bei stärkeren Verzerrungsstufen nicht mehr gehört.

Wortgruppe 5:

/f/ in Wurf wird nur einmal bei schwacher Verzerrung verstanden. /F/ und /s/ werden bei allen Verzerrungsstufen kaum verstanden. /G/ und /S/ in Glas werden bei schwacher Verzerrung noch relativ gut verstanden, ab mittlerer Verzerrung

kaum mehr.
/H/ und /f/ in Huf werden bei allen Verzerrungen kaum verstanden, nur vereinzelt bei schwacher Verzerrung. /Pf/ in Pfau wird überhaupt nicht verstanden. /B/ in Block wird von 2/3 aller Patienten nur bei schwacher Verzerrung verstanden. /S/ in Schlag wird von 50 % der Patienten bei schwacher Verzerrung, und in Stroh größtenteils bis mittlerer Verzerrung verstanden. /R/ und /t/ in Rest wird bei stärkerer Verzerrung schlechter verstanden. /S/ und /p/ in Spind werden überhaupt schlecht verstanden. /F/ und /t/ in Torf wird bei starker Verzerrung nicht mehr, bei mittlerer Verzerrung nur noch teilweise gehört. /S/ in Schein wird überwiegend bei starker Verzerrung nicht mehr verstanden, teilweise auch schon vorher nicht mehr. /H/ und /f/ in Huf werden sehr schlecht verstanden.

6. Vergleich zwischen Normalhörenden und Innenohrschwerhörigkeit-Patienten der verstandenen und nicht verstandenen Laute

a) Bei mittlerem Verzerrungsgrad (Abb. 10a und 10b)

/ɛ/ wird bei Normalhörenden besser verstanden, ebenso /ɳ/l/ /d/; letzterer wird beim Innenohrschwerhörigkeit-Patienten am zweitschlechtesten gehört, während er bei Normalhörenden relativ gut gehört wird. /a/ wird dagegen bei Innenohrschwerhörigen wessentlich besser gehört als bei Normalhörenden. Bei /x/ wird dieser Laut vom Innenohrschwerhörigen am schlechtesten gehört, während Normalhörende ihn noch relativ gut verstehen.

b) Bei starker Verzerrung (Abb. 11a und 11b)

/z/ wird bei Innenohrschwerhörigkeit schlechter gehört, /ʂ/ bei Innenohrschwerhörigkeit wesentlich schlechter, ebenso /s/; /p/ wird dagegen bei Innenohrschwerhörigkeit besser verstanden.

Ergebnis:

Im allgemeinen ergibt sich eine Übereinstimmung der nicht-verstandenen Laute bei Innenohrschwerhörigkeit-Patienten und Normalhörenden. Bei mittlerer Verzerrung werden die Konsonanten von Normalhörenden besser verstanden als von Innenohrschwerhörigen.

Einzige Auffälligkeit bei mittlerer Verzerrung: /a/ wird von Innenohrschwerhörigen besser verstanden als von Normalhörenden, wobei hier allerdings ein Pegeleffekt (Innenohrschwerhörige wurden bei höheren Pegeln geprüft) nicht auszuschließen ist.

Bei starker Verzerrung werden die Laute /p/f/h/ɦ/ʃ/ɛ/O/r/a/ vom Innenohrschwerhörigen besser verstanden als von den Normalhörenden.

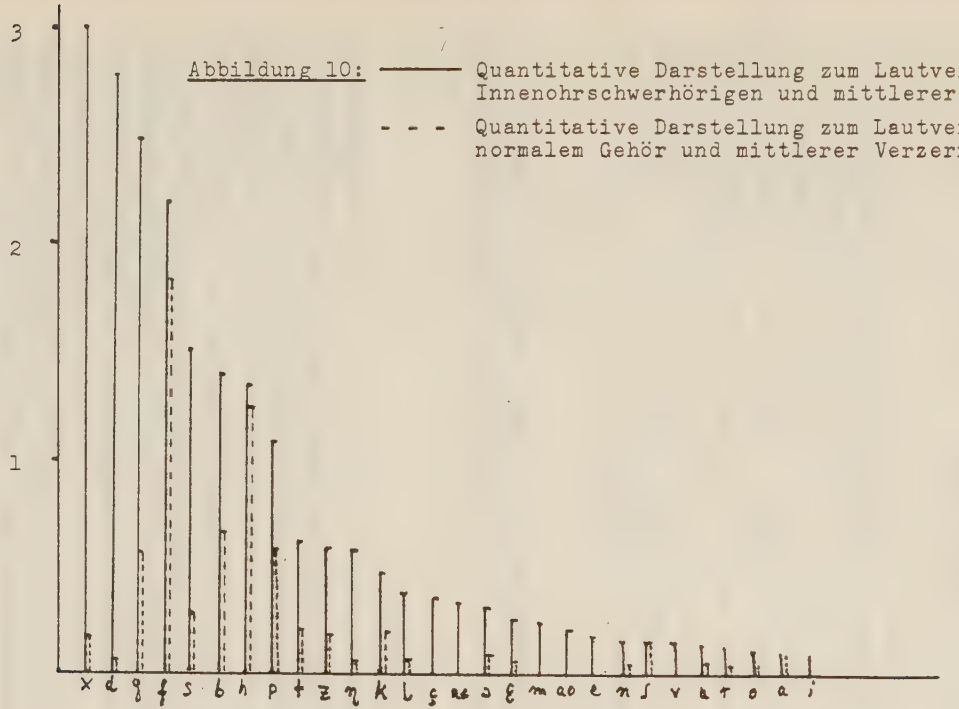


Abbildung 10: ——— Quantitative Darstellung zum Lautverständnis bei Innenohrschwerhörigen und mittlerer Verzerrung

\- - - Quantitative Darstellung zum Lautverständnis bei normalem Gehör und mittlerer Verzerrung (Raichle)

Lautreihenfolge von leise bis laut bei normalem Gehör und unverzerrter Sprache:

h f b d g x k t p r s v z ʃ l m ŋ n

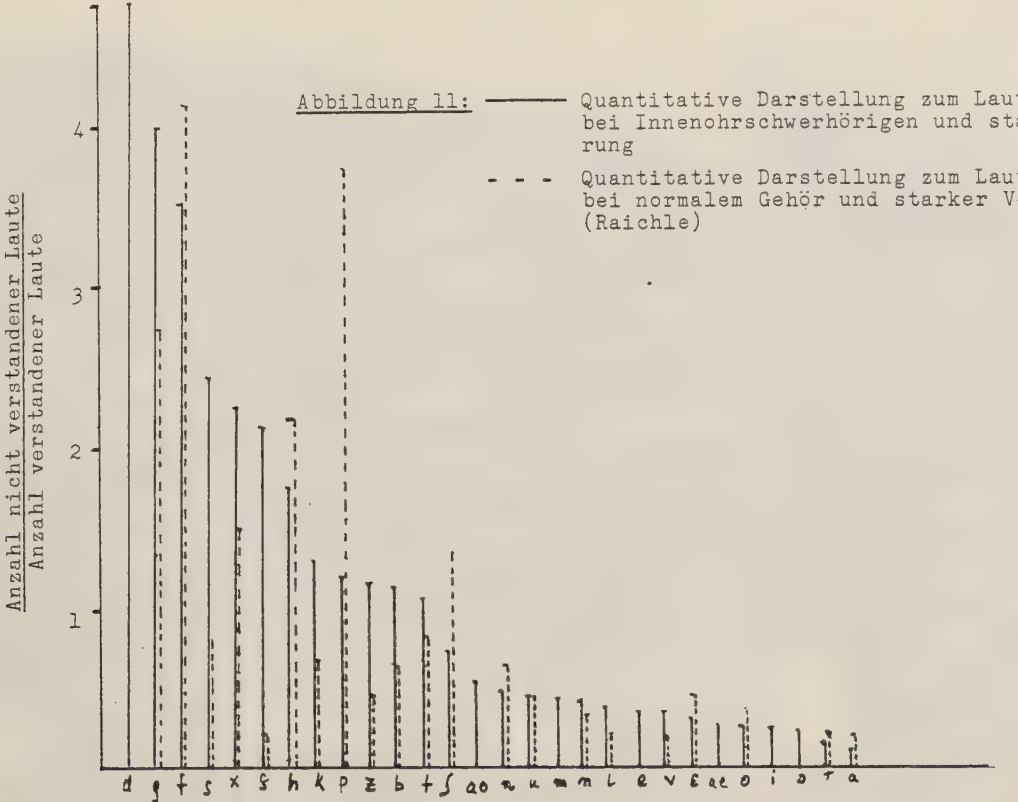


Abbildung 11: ——— Quantitative Darstellung zum Lautverständnis bei Innenohrschwerhörigen und starker Verzerrung

\- - - Quantitative Darstellung zum Lautverständnis bei normalem Gehör und starker Verzerrung (Raichle)

7. 3-dimensionale Analyse des Wortes Frist

Zur dreidimensionalen Darstellung ist das Wort Frist gut geeignet, da mit zunehmender Verzerrung nur noch die Laute mit hohen Intensitäten übrig bleiben, während die leisen Konsonanten /s/ und /t/ verschwinden. Die Laute /r/ und /i/ wurden selbst bei starker Verzerrung noch verstanden, /F/ wurde schon bei schwacher Verzerrung kaum gehört. Viele Patienten verstanden entweder bei mittlerer Verzerrung ein /G/ oder ein /R/ anstatt /F/, oder sie verstanden das Wort überhaupt nicht. Bei starker Verzerrung war es ähnlich.
Bei der Analyse der Bilder ist auffällig, daß bei mittlerer und starker Verzerrung das intensitätsschwache /F/ verschwunden ist. Das hochfrequente /t/ ist bei starker Verzerrung stark geschrumpft. Daraus ergibt sich, daß die höherfrequenten Anteile durch die Nulldurchgangsverzerrung stark geschwächt werden, und bei starker Verzerrung nur noch tieffrequente Wortanteile deutlich vorhanden sind (/r/i/).

Abbildung 12 zeigt die 3-dimensionale Analyse von Frist:
A: Frist ohne Verzerrung
B: Frist bei schwacher Verzerrung
C: Frist bei mittlerer Verzerrung
D: Frist bei starker Verzerrung

8. 2-dimensionale Analyse des Wortes Frist

In der 2-dimensionalen Analyse nimmt die Intensität der Laute /F/s/t/ mit zunehmender Verzerrung ab, während der Anteil für /r/ und /i/ fast gleich bleibt. So rät der Patient, und aus Frist wird Rist, Ritt oder Rip.
Die Konsonanten /F/s/ und /t/ sind bei starker Verzerrung auf Null gesetzt, während der Vokal /i/ kaum beeinflußt wird. Der Vokal reicht allein zum Verständnis eines Wortes nicht aus.

Abbildung 13 zeigt die 2-dimensionale Analyse von Frist mit zunehmender Verzerrung.

Abbildung 12

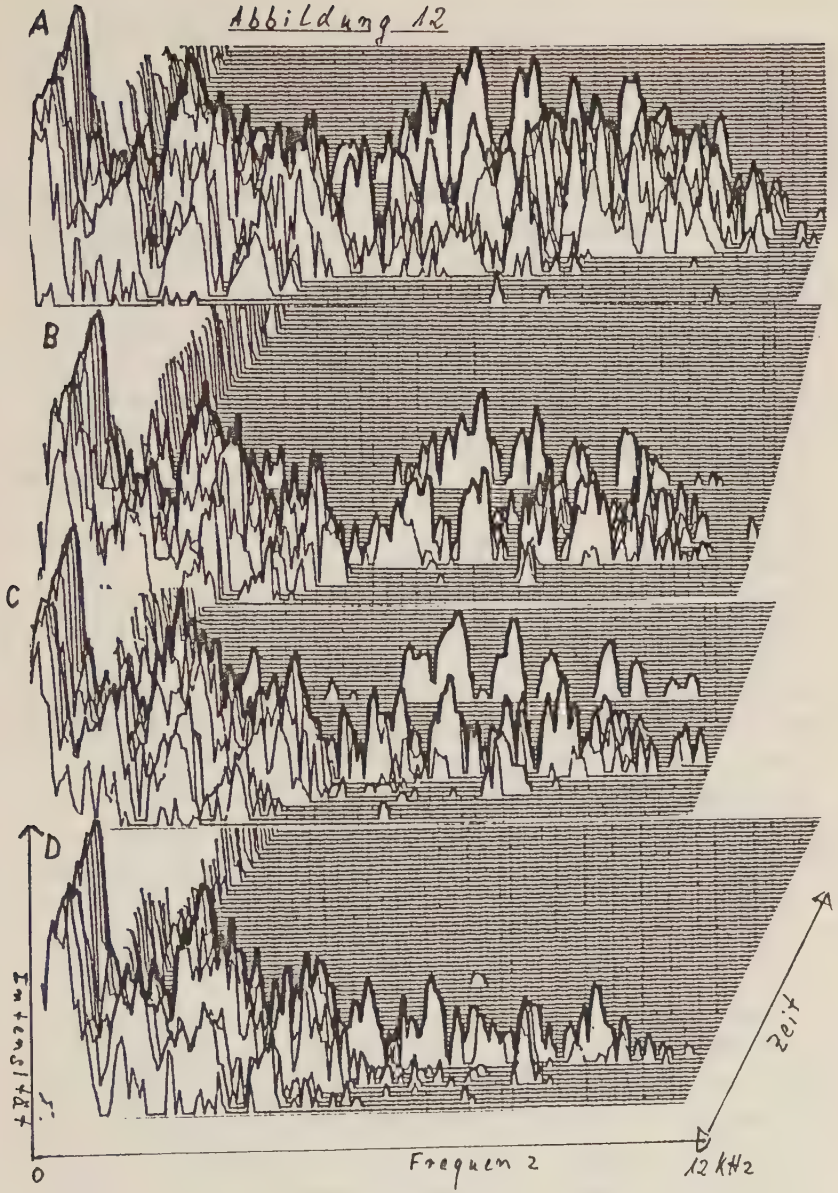
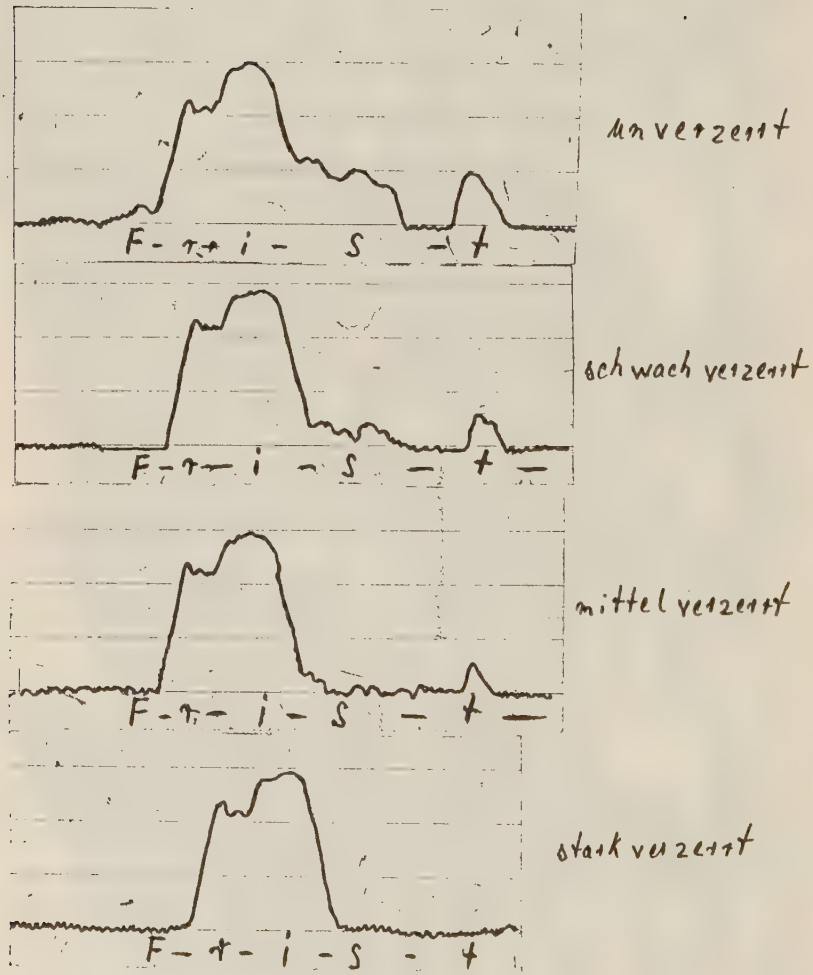


Abbildung 13



IV. DISKUSSION

1. Auswirkungen des center-clipping auf die Lautverständlichkeit

Durch die Nulldurchgangsverzerrung werden Laute mit schwachen Intensitäten (Konsonanten) unverständlich. Bei vorliegender Untersuchung wurden bei starker Verzerrung die Laute in der Reihenfolge /d/g/f/s/x/ç/h/k/p/z/b/t/ am schlechtesten verstanden. Fairbanks[9] schreibt, daß die Nasallaute beim Rhyme-Test am besten gehört werden, während 2/3 der stimmlosen Konsonanten am schlechtesten verstanden werden. Der niedrige Pegel dieser Konsonanten wird durch center-clipping auf Null gesetzt. Die Vokale mit ihren hohen Intensitäten (z.B. /a/i/e/) werden selbst bei guter Verzerrung noch gut verstanden.

Für die Sprachverständlichkeit sind nach Dunker[8] Ein- und Ausschwingungsvorgänge sehr wichtig. Der erste Laut eines Wortes ist oft entscheidend für die Verständlichkeit des gesamten Wortes. Dies deckt sich mit vorliegender Untersuchung. Bei den verschiedenen Verzerrungsgraden schwach, mittel, stark nimmt die Verständlichkeit ab, wobei die Lautverständlichkeit gegenüber der Wortverständlichkeit deutlich besser ist. Wenn der erste Laut eines Wortes nicht verstanden wurde, haben die Patienten oft das ganze Wort nicht verstanden, während einzelne Laute noch richtig gehört wurden. Dies sind größtenteils Vokale, die selbst bei starker Verzerrung noch erkannt wurden.

O'Neill und Dreher[24] untersuchten die Maskierung englischer Wörter durch verlängerte Vokalklänge. Dabei kommen Nasallaute und Fließlaute in ihrer Untersuchung vorwiegend in Wörtern mit niedriger Verständlichkeit vor, während Reibelaute gehäuft in Wörtern mit guter Verständlichkeit vorkommen. Bei vorliegender Untersuchung sind Reibelaute (z.B. /f/s/) sehr schlecht verstanden worden, während Nasenlaute (z.B. /m/n/) bei starker Verzerrung noch relativ gut ver-

standen wurden. Dies ist zwar nicht in Einklang zu bringen mit den Untersuchungen von O'Neill und Dreher, die jedoch englische Wörter benützten und kein center-clipping verwendet haben.

Nach Brubaker und Dolpheide[7] tragen die stimmlosen Verschlußlaute wie /p/t/k/ mehr zum Verständnis der Silben bei, als die übrigen Konsonanten. Wardrip-Fruin[42] schreibt dagegen, daß stimmhafte Verschlußlaute wie /b/d/g/ am Ende englischer Wörter besser verstanden werden als stimmlose Verschlußlaute. Bei der Nulldurchgangsverzerrung in vorliegender Untersuchung werden die stimmlosen oder stimmhaften Verschlußlaute gleich schlecht verstanden, unabhängig von der Stellung des Lautes.

2. Psychoakustik der Sprachverständlichkeit

Das Verständnis der Sprache ist an Leistungen der Hirnrinde und übergeordneter Assoziations- oder sekundärer Rindenfelder gekoppelt. Bei sprachaudiometrischen Tests ist nicht nur die Leistung des peripheren Gehörs entscheidend, sondern auch die Leistung der übergeordneten assoziativen Fähigkeiten.

Das Verständnis gesprochener Sprache läßt sich in eine Reihe hierarchisch geordneter Ebenen gliedern.
Jede höhere Stufe engt die Möglichkeit dessen ein, was der Sprecher gesagt haben könnte; erleichtert also durch Vorauswissen und Redundanz das Verstehen. Die einzelnen dieser Ebenen werden durch verschiedene Sprachprüfungen sondiert[4]:

Ebene 1: Kenntnis, welche Laute in der Sprache vorkommen
Ebene 2: Kenntnis des gebräuchlichen Vokabulars
Ebene 3: Schulmäßiges oder intuitives Wissen, daß es Wortkategorien gibt: Substantive, Verben, Zahlwörter usw.

Die Freiburger Sprachteste gehören in Ebene 3.

Unter erschwerten Bedingungen wie z.B. Geräuschverdeckung, Frequenzbeschneidung oder Hochtonschwerhörigkeit werden die Sprachlaute zum Teil nicht richtig identifiziert und es treten Verwechslungen auf. Zunächst nicht voll verstandene Worte gehen ins Momentangedächtnis über, bis die Synthese assoziativ gelingt[10].

Für das Verständnis ist es wichtig, wie ein Wort ausgesprochen wird. Dies wirkt sich auch auf die phonetischen Segmente aus. Nach Miller und Grosjean[23], die das Wort 'ra-p-id' und 'ra-b-id' im Verhältnis Artikulations- zum Pausenteil analysierten wenn /p/ und /b/ nicht ausgesprochen werden, ist Verstehen auch von der Aussprache eines Wortes abhängig.

Es ist bei einem Wort möglich, Anfangs-, Mittel- und Endlaut durch Geräusche zu ersetzen. Das Verständnis ist bei periodischen Signalen (Vokale) gut, der Prüfling assoziiert fehlende Vokale und versteht das Wort[29].
Weniger gut ist das Verständnis bei Reibelauten (z.B. /f/s/). Bei unperiodischen Geräuschen ist es umgekehrt. Die Wiedereinsetzung der phonetischen Segmente ist abhängig vom akustischen Signal und der Erwartung des Prüflings[29].

Nach Summerfield[33] ist das Verständnis von stimmhaften und stimmlosen Verschlußkonsonanten von der Artikulationsweise abhängig. Nach Soli[30] ist das Verständnis dagegen mehr von der akustischen Struktur des Lautes abhängig.

3. Zentrale Verarbeitung des Schallreizes und Innenohrpotentiale

Schallfrequenz, Schalldruck, Schallrichtung und Entfernung der Schallquelle werden vom Ohr aufgenommen und zur Weiterleitung im Hörnerv kodiert. Unterschiedliche Frequenzen werden entlang der Kochlea getrennt 'abgebildet' und auch in getrennten Fasern der Hörbahn weitergeleitet. Die zentrale Identifizierung der Frequenzen, aus dem ein Klang oder ein Geräusch besteht, führt zum Erkennen der Schallquelle.

Ähnliche Frequenzen können dabei sehr gut getrennt werden; z.B. kann 1003 Hz noch von 1000 Hz unterschieden werden, was eine Frequenzunterschiedswelle von 0,003 bedeutet. Dieses feine Unterscheidungsvermögen wird durch Kontrastbildung entlang der Hörbahn erreicht, die relativ grobe Frequenz-'Abbildung' in der Kochlea wird bei der Informationsweiterleitung entlang der Hörbahn mehr und mehr verfeinert.

Aber nicht nur die Frequenzunterschiedsschwelle ist bedeutsam. Ebenso bedeutsam ist der Frequenzfiltermechanismus, der bei einem komplexen Schallereignis die hohen Frequenzen efferent drosselt und die tiefen Frequenzen heraushebt[25], was als neuraler Tiefpaß bezeichnet wird.

Die Intensitätsunterschiedsschwelle ist mit 0,1 (1 dB) sehr viel größer. Ein Schallereignis wird erst bei einer Schallintensitätsänderung von ca. 10 % (Schalldruck um mehr als 5 % verändert) als lauter oder leiser empfunden.
Ein lauteres Schallereignis führt zu häufigeren Aktionspotentialen in der ableitenden Nervenfaser und zur Einbeziehung benachbarter Nervenfasern bei der Informationsweiterleitung. Bei unterschiedlich lauten Tönen ist die Intensität entscheidend[28]. Der Ton mit größerer Intensität wird als Information weitergeleitet, während der leisere verdeckt wird. Ebenso können auch Zwischentöne entstehen zwischen einem lauten und leisen Ton. Diese Maskierung ist für das Sprachverständnis mitentscheidend.

Am Innenohr können außer den Aktionspotentialen in den abführenden Nervenfasern noch ein Bestandspotential: gegenüber der Perilymphe ungleiche K^+- und Na^+-Verteilung in der Endolymphe und im Haarzellenbereich; und ein Mikrophonpotential: läßt sich am runden Fenster ableiten und gibt wie ein Mikrophon den zeitlichen Verlauf des Reizes wieder; abgeleitet werden.

Die zentralen Umschaltstationen sind folgende: Cortisches Organ, Spiralganglion, vorderer und hinterer Kochlearis-

kern, obere Olive mit Nucleus accesorius, seitlicher Schleifenkern, untere Vierhügel, mediale Kniehöcker und primäre Hörrinde. Hier sind die verschiedenen Frequenzen z.T. noch getrennt vorhanden, in den sekundären Hörzentren wird dann bereits nach Klang und Geräuschmustern sortiert.

4. Einfluß von Nulldurchgangsverzerrungen auf die Innenohrschwerhörigkeit und Tonndorfs Theorie

Center-clipping, das durch die partielle Entkopplung der Deckmembran mit den Stereozilien verursacht wird, ist nach Tonndorf[37,38] die unmittelbare Ursache des Rekruitment bei akuten Innenohrveränderungen.

Das Rekruitment wird folgendermaßen verursacht: die Schwelle der äußeren Haarzellen ist niedriger als die der inneren. Sie sprechen auf leisere Töne an und werden leichter und häufiger geschädigt als die inneren Haarzellen. Letztere treten erst bei größeren Lautstärken in Tätigkeit, sind widerstandsfähiger und bleiben länger intakt. Daher werden von manchen Innenohrschwerhörigen leise Töne nicht, laute jedoch ebenso laut empfunden wie bei Normalhörenden. Eine Lautstärkesteigerung erregt die inneren Haarzellen, wirkt jedoch durch die eingeengte Dynamik wegen des Ausfalls der äußeren Haarzellen verzerrend. Die Verzerrung ist um so stärker je unterschiedlicher die einzelnen Frequenzareale daran beteiligt sind[21] (z.B. bei Hochton-Tieftonschwerhörigkeit). Dabei ist das Verhältnis der Laute zueinander gestört, der Kontrast zwischen lauten und leisen Sprachanteilen wird stärker (s.o. 2-dimensionale Darstellung von Frist). Nach Tonndorf[37,38] macht sich der durch center-clipping verursachte Übertragungsverlust vorwiegend bei niederen Amplituden bemerkbar, und fällt bei höheren Amplituden zunehmend weniger ins Gewicht (Schaubild 1 B). Dynamisch führt dies zur zentralen Beschneidung der Wellenform, zur Nulldurchgangsverzerrung. Die schlechte Sprachverständlichkeit wird nach Tonndorf (1980) durch center-clipping

verursacht, wobei er nicht ausschließt, daß noch eine Maskierung von Tieftongeräuschen hinzukommen könnte (1977).

In seinem Artikel von 1980 schlägt Tonndorf vor, daß die schlechte Sprachverständlichkeit ebenso wie beim Rekruitment durch center-clipping verursacht wird. Im Unterschied zum Rekruitment liegt die Störung jedoch nicht im Amplitudenbereich, sondern im zeitlichen Bereich, in dem sich der Betrag des Nulllinienplateaus mit ansteigenden Signalamplituden schneller verändert, als der Betrag der relativen Amplitudenreduzierung.

In vorliegender Untersuchung wurde festgestellt, daß ebenso wie bei den Normalhörenden, die Sprachverständlichkeit mit zunehmender Nulldurchgangsverzerrung abfällt.Bei den Normalhörenden konnte ab Pegeln von 60 dB und starker Verzerrung keine Verbesserung der Sprachverständlichkeit beobachtet werden.
Der Innenohrschwerhörige hört bei einem Relativpegel von 50 dB (SL) und starker Verzerrung signifikant schlechter, als der Normalhörende bei starker Verzerrung und einem Pegel von 45 dB (SPL). Beim Normalhörenden hat ab 45 dB eine Erhöhung des Pegels fast keine Zunahme der Verständlichkeit mehr zur Folge (s. Abb. 9). Da der Innenohrschwerhörige ab diesem Pegel signifikant schlechter hört als der Normalhörende, ergibt sich auch bei ihm ein pegelunabhängiger Effekt. Auch bei höheren Pegeln würde die Sprachverständlichkeit nicht mehr zunehmen.
Unterstützt wird dies durch folgende Beobachtung: Teilweise wurde versucht beim Innenohrschwerhörigen eine bessere Verständlichkeit beim Freiburger Wörtertest durch höhere Pegel zu erreichen. Dies war jedoch nicht möglich, da recht schnell die Schmerzschwelle erreicht wurde.
Bei manchen Schallempfindungsschwerhörigen wird trotz maximaler Verstärkung bei normalem Freiburger Hörtest keine 100 % Verständlichkeit erreicht, es besteht ein Diskriminationsverlust. Der Hörverlust ist besonders stark in den hohen Frequenzen. Bei Patienten mit überempfindlichen Ohren

sinkt das Sprachverständnis bei größeren Lautstärken sogar wieder ab.

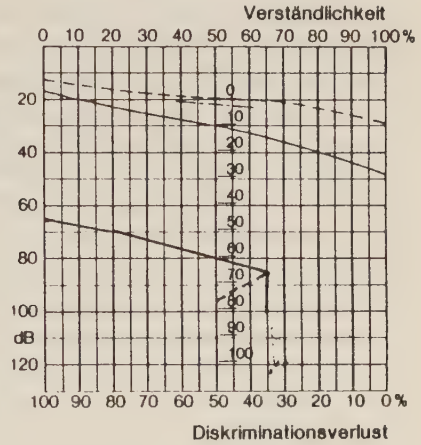


Abbildung 14

Beispiel einer Diskriminationskurve mit Abfall des Sprachverständnisses bei größeren Lautstärken

Nach Tonndorf ist der Einfluß von Nulldurchgangsverzerrungen bei höheren Pegeln geringer. Was in vorliegender Untersuchung einem geringerem Verzerrungsgrad entspricht, würde bei Tonndorf höheren Pegeln entsprechen. Bei geringer Verzerrung ist das Sprachverständnis bei Innenohrschwerhörigkeit bei ca. 50 % und sinkt mit steigender Verzerrung. Dies könnte Tonndorf's Theorie entsprechen. Nicht zu erklären ist mit seiner Theorie die Helm-Kurve, bei der die Sprachverständlichkeit mit zunehmenden Pegeln wieder sinkt.

Im mittleren Pegelbereich könnte das geringe Sprachverständnis durch Nulldurchgangsverzerrungen erklärt werden. Eine Reihe von Phänomenen passen dazu. Für diese Theorie spricht, daß der Normalhörende besser versteht, als der Innenohrschwerhörige. Ebenso, daß bei der Lautauswertung bei starker Verzerrung der Innenohrschwerhörige einige Laute besser versteht als der Normalhörende. Es könnte dadurch zu einer Addition von solchen Effekten kommen.

Bei Erhöhung des Pegels müßte nach Tonndorf das Wortverständnis besser werden (Schaubild 1 B), weil die Nulldurchgangsverzerrungen geringer werden. In Bezug auf die Lautheit könnte Tonndorf's Theorie, daß ein mechanischer Effekt die Ursache der aufgeführten Innenohrveränderungen ist, zutreffen. Eine Erhöhung des Pegels bedeutet für den Innenohrschwerhörigen jedoch oft eine Abnahme des Verständnisses.

V. ZUSAMMENFASSUNG

20 Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit (Schallempfindungsschwerhörigkeit), im Alter zwischen 14 und 71 Jahren, wurden mit dem Freiburger Hörtest, der durch Nulldurchgangsverzerrungen verändert wurde, getestet.

Den Patienten wurden 3 verschiedene Tonbänder dargeboten, auf denen in wechselnder Reihenfolge die Gruppen 2 - 10 des Freiburger Wörtertests in verschiedenen Verzerrungsstufen nulldurchgangsverzerrt waren, um Ungleichheiten der Wörtergruppen zu nivellieren. Die Wortgruppen waren schwach, mittel, stark verzerrt und wurden dem Patienten jeweils mit individuellen Pegeln dargeboten (abhängig vom Tonschwellenaudiogramm: Hörverlust im Bereich 30 - 80 dB; im Sprachaudiogramm noch eine Wortverständlichkeit über 50 %). Zwischen der Verständlichkeit der Wortgruppen und der Verzerrung besteht ein Abfall des Verständnisses bei ansteigender Verzerrung. Bei starker Verzerrung wurde eine Sprachverständlichkeit von 33 % erzielt. Dieser Wert ist pegelunabhängig, d.h. selbst bei höchsten Prüfpegeln an der Grenze zur Schmerzschwelle ändert sich die Verständlichkeit nicht mehr. Was an Information durch die Nulldurchgangsverzerrung verloren geht, kann bei starker Verzerrung nicht mehr verstanden werden. Der Wegfall der Konsonanten bei schwächeren Verzerrungen wirkt sich stark auf die Verständlichkeit aus.

Bei der Lautauswertung wurde eine bessere Verständlichkeit erzielt, als bei der Wortauswertung. Laute mit hohen Intensitätspegeln, wie z.B. Vokale, wurden bei starker Verzerrung noch relativ gut verstanden. Laute mit niederen Intensitätspegeln wurden bei schwächeren Verzerrungsstufen gelöscht.

Tonndorfs Theorie, daß für die schlechte Sprachverständlichkeit ein mechanischer Defekt durch die Entkopplung der Zilien von der Deckmembran schuld ist und dadurch ein Informationsverlust durch center-clipping entsteht, der bei höheren Pegeln wieder besser wird, konnte in einem wesentlichen

Punkt nicht bestätigt werden. Die Sprachverständlichkeit verschlechtert sich mit zunehmenden Prüfpegel oft bei der Innenohrschwerhörigkeit. Einzelne Phänomene konnten mit Tonndorfs Theorie erklärt werden, andere entscheidende jedoch nicht.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

1) Ammersbach, K.; Meister, F.J. — Ein Wortkatalog für isophone Sprachgehörprüfung. Arch. Ohr.-Nas.- u. Kehl.-Heilk. 157 (1950) 352

2) Ammersbach, K.; Meister, F.J. — Ein Wortkatalog für isophone Sprachgehörprüfung. Arch. Ohr.-Nas.- u. Kehl.-Heilk. 158 (1950) 484

3) Ammersbach, K.; Meister, F.J. — Beiträge zur Definition des Sprachgehörverlustes. Z. Laryng. Rhinol. 31 (1952) 406

4) Berendes, J.; Altmann, F.; Feldmann, H. — Audiometrie bei Erwachsenen. Hals-Nasen-Ohren-Heilk. in Praxis u. Klinik, Bd. 5, Ohr I, 2. Aufl. Stuttgart: Thieme Verlag 1979

5) Boenninghaus, H.G. — Hals-Nasen-Ohren-Heilk. für Medizinstudenten. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1980

6) Boenninghaus, H.G. — Hals-Nasen-Ohren-Heilk. für Medizinstudenten. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1972

7) Brubaker, R.S.; Dolpheide, W.R. — Consonant and vowel influences upon judged voice quality of syllables. J. acoust. Soc. Amer. 27 (1955) 996-1001

8) Dunker, E. — Zentrale Bahnsysteme und Verarbeitung akustischer Nachrichten. Physiol. des Menschen Bd. 12 57-120. München, Berlin, Wien: Urban u. Schwarzenberg Verlag 1972

9) Fairbanks, G. — Test of phonemic differentiation, the rhyme test. J. acoust. Soc. Amer. 30 (1958) 596-600

10) Fournier, J.E. — Sur le méchanisme de la conduction osseuse. Ann. Oto-laryng. 70 (1953) 401, 527

11) Gottesberger, A.M. — Menièresche Krankheit. Hals-Nasen-Ohren-Heilk. in Praxis und Klinik. 2. Aufl. Bd. 6 Ohr 2. Stuttgart: Thieme Verlag 1980

12) Hahlbrock, K.H. Über Sprachaudiometrie und neue Wörterteste
Arch. Ohr.-, Nas.- u. Kehlk.-Heilk. 162 (1953) 394

13) Hahlbrock, K.H. Audiometrie
Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde
1. Aufl. Bd. 3/1
Stuttgart: Thieme Verlag 1965

14) Harris, G.G. Brownian motion in the chochlear partition
J. acoust. Soc. Amer. 44 (1968) 176

15) Kainz, F. Psychologie der Sprache
2. Aufl. Bd. 4
Stuttgart: Enke Verlag 1954

16) Kimura, R.S. Experimental patogenesis of hydrops
Arch. Ohr.-, Nas.- u. Kehlk.-Heilk. 212 (1976) 263-275

17) Klinke, R. Stimme und Sprache
Physiologie des Menschen Bd.12 9-51
München, Berlin, Wien: Urban u. Schwarzenberg Verlag 1972

18) Lampert, H. Die Mängel der bisherigen Hörprüfung mit der Sprache
Z. Hals-Nasen-Ohrenheilk. 5 (1923) 69

19) Licklider, J.C.R.; Pollack, I. Effects of differentiation, integration and infinite peak-clipping upon the intelligibility of speech
J. acoust. Soc. Amer. 20 (1948) 42-51

20) Licklider, J.C.R. Effects of amplitude distortion upon the intelligibility of speech
J. acoust. Soc. Amer. 18 (1946) 429-434

21) Lidèn, G. Speech audiometry
Acta Oto-laryng. (Stockh.) Suppl. 114 (1954) 1

22) Lullies, H. Stimme und Sprache
Physiologie des Menschen Bd. 12 215-259
München, Berlin, Wien: Urban u. Schwarzenberg Verlag 1972

23) Miller, J.L.; Grosjean, F. — How the components of speaking rate influence perception of phonetic segments
J. Exp. Psychol. (Hum. Percept) 7 (1981) 208-215

24) O'Neill, J.J.; Dreher, J.J. — Masking of English words by prolonged vowel sounds
J. acoust. Soc. Amer.

25) Pirig, W.; Pfalz, R. — Die Wirkung gekreuzter auditorischer Efferenzen auf akustisch deafferente Einzelneurone im Nucleus cochlearis, die von homolateral elektrisch erregt worden waren (Meerschweinchen)
Arch. klin. exp. Ohren- usw. Heilkunde 187 (1966) 595

26) Raichle, H. — Der Einfluß von Nulldurchgangsverzerrungen auf das Sprachverständnis bei Normalhörenden
Tübingen: Dissertation 1983

27) Ranke, O.F. — Die Fortentwicklung der Hörtheorie und ihre klinische Bedeutung
Arch. Ohr.- Nas.- u. Kehlk.-Heilk. 167 (1955) 1

28) Rose, J.E.; Brugge, J.F.; Anderson, D.J.; Hind, J.E. — Some possible correlates of combination tones
J. Neurophysiol. 32 (1969) 402-423

29) Samuel, A.G. — Phonemic restoration: Insights from a new methology
J. Exp. Psychol. (Gen.) 110 (1981) 474-494

30) Soli, S.D. — Some effects of acoustic attributes of speech on the processing of phonetic feature information
J. Exp. Psychol. (Hum. Percept.) 6 (1980) 622-638

31) Spoendlin, H. — Akustisches Trauma
Hals-Nas.-Ohr.-Heilk. in Praxis und Klinik
2. Aufl. Bd. 6 Ohr 2
Stuttgart: Thieme Verlag 1980

32) Spoendlin, H. — The organisation of the cochlear receptor
Fortschr. Hals-Nas.-Ohrenheilk. 13 (1966)

33) Summerfield, Q. Articulatory rate and perceptual constancy in phonetic perception J. Exp. Psychol. (Hum. Percept.) 7 (1981) 1074-1095

34) Schmidt, P.H. Electrocochleographic diagnosis Arch. Ohr.-, Nas. u. Kehlk.-Heilkunde 212 (1976) 315-320

35) Schubert, K. Diagnostische Fortschritte durch Tonhöhenunterschiedsschwellenmessung Arch. Ohr.-, Nas.- u. Kehlk.-Heilk. 161 (1952) 299

36) Schuknecht, H.F. Pathophysiology of endolymphatic hydrops Arch. Ohr.-, Nas.- u. Kehlk.-Heilk. 212 (1976) 253- 262

37) Tonndorf, J. Acute cochlear disorders: the combination of hearing loss, recruitement, poor speech discrimination, and tinnitus Ann. Otol. 89 (1980) 353-358

38) Tonndorf, J. Ein Vorschlag zur gemeinsamen Genese von Hörverlust, Rekruitment und Ohrgeräuschen bei akuten Innenohrveränderungen Arch. Oto-rhino-laryngol. 217 (1977) 289-296

39) Tonndorf, J. Endolymphatic hydrops; mechanical causes of hearing loss Arch. Ohr.-, Nas.- u. Kehlk.-Heilk. 212 (1976) 293-299

40) Tonndorf, J. Pathophysiology of the hearing loss in Menière's disease Otolaryng. Clin. N. Amer. Oct. (1968) 375-388

41) Tonndorf, J. The mechanism of hearing loss in early cases of endolymphatic hydrops Ann. Otol. (St. Louis) 66 (1959) 591

42) Wardrip-Fruin, C. On the status of temporal cues to phonetic categories: preceding vowel duration as a cue to voicing in final stop consonants J. acoust. Soc. Amer. 71 (1982) 187-195

LEBENSLAUF

Ich, Berthold Kratzenstein, wurde am 2.1o.1951 als viertes Kind des Steuerrats Berthold Kratzenstein und seiner Ehefrau Susanne geb. Kast in Goslar geboren.
Nach dem Besuch der Volksschule 1958-1963 in Neuenbürg/Württ., Heiligenbronn Kr. Horb/Württ. und Reutlingen , trat ich 1963 in das math.-nat. Johann-Kepler-Gymnasium in Reutlingen ein. Ab 1969 besuchte ich das Friedrich-List-Gymnasium in Reutlingen und bestand 1972 das math.-nat. Abitur.
1972 immatrikulierte ich mich in Rechtswissenschaft an der Universität Tübingen. Ab dem SS 1977 begann ich mit dem Medizinstudium an der Universität Tübingen und bestand 1980 das Physikum. Ab dem SS 1980 exmatrikulierte ich mich im Fachbereich Rechtswissenschaft und immatrikulierte mich im Fachbereich Zahnmedizin, in dem ich im April 1981 die Zahnärztliche Vorprüfung bestand. Am 12.10.1983 habe ich das Staatsexamen in Zahnmedizin abgelegt.